

تاريخ
الطاقة والحضارة

فاكلاف سميل

ترجمة: د. محمد زياد كبة



فاكلاف سميل

تاريخ الطاقة والحضارة

ترجمة
أ. د. محمد زياد كبة

مراجعة
محمد فتحي خضر

بيانات الفهرسة أثناء النشر

TJ163.5 .S623125 2020

-Smil, Vaclav, 1943

تاريخ الطاقة والحضارة / تأليف فاكلاف سميل ؛ ترجمة محمد زياد كبة؛ مراجعة محمد فتحي خضر. ط. 1. أبوظبي: دائرة الثقافة والسياحة، كلمة، 2020.

757 ص. ؛ 15 * 23 سم.

ترجمة كتاب: Energy and Civilization: A History

تدمك: 978-9948-36-927-1

1- مصادر الطاقة- تاريخ. 2- مصادر الطاقة- الأحوال الاجتماعية.

3- التكنولوجيا والمجتمع. أ- كبة، محمد زياد. ب- خضر، محمد فتحي.

ج- العنوان.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنجليزي:
Vaclav Smil
Energy and Civilization: A History
First MIT Press paperback edition, 2018

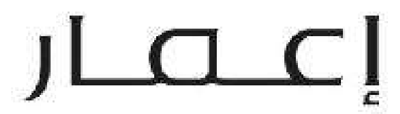
نُشر هذا الكتاب بدعم من «إعمار»
وشركة «إعمار» العقارية



www.kalima.ae

ص.ب: 94000 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، Info@kalima.ae هاتف: 579 5995 2 +971





تاريخ الطاقة والحضارة

المحتويات

مقدمة وتنويه

في يوليو (تموز) من عام 1993 فرغت من تأليف كتاب «الطاقة في تاريخ العالم» الذي صدر في عام 1994 وظل متاحاً طيلة عقدين من الزمن. وحيث إن دراسات الطاقة شهدت توسعاً هائلاً منذ عام 1994، فقد أضفت إليه تسعة كتب أخرى تتناول بالدرجة الأولى قضايا الطاقة، واثني عشر كتاباً متعدد التخصصات فيها أجزاء كبيرة تتعلق بالطاقة، لذلك حين عزمت على العودة إلى هذا الموضوع المثير كان واضحاً أن الاكتفاء بتحديث سطحي لن يفي بالغرض. وهكذا خرج الكتاب الحالي بحلة جديدة وبعنوان جديد. فالنص الجديد أطول من الأصل بنحو 60%، وصوره أكثر بنسبة 40%. أما المراجع فزادت بنسبة الضعفين. تضم المربعات النصيَّة المنتشرة بين ثنايا الكتاب بعض الإحصاءات اللافتة للانتباه، علاوة على تفسيرات مفصلة لبعض الموضوعات المهمة وجداول أساسية. كما أنني اقتبست من مصادر تتراوح من الأعمال الكلاسيكية - مثل أبوليوس Apuleius ولوكريشوس Lucretius، وبلوتارك Plutarch - إلى مراقبين من القرنين التاسع عشر والعشرين مثل برودل Braudel وإيدن Eden وأورويل Orwell وسينانكور Senancour. وقد أتمت باونس ديزاين Bounce Design في وينيبيغ Winnipeg تحديث الأشكال وإعدادها. وقد حصلت على عدد من الصور من كوربيز Corbis في سياتل Seattle وهي من عمل إيان سوندرز Ian Saunders وأنو هورسمان Anu Horsman. وكما هي حال الدراسات المتعددة التخصصات، فإنه ما كان من الممكن إنتاج هذا الكتاب لولا جهد مئات المؤرخين والعلماء والمهندسين وعلماء الاقتصاد.

وينيبيغ، أغسطس (آب) 2016.

مقدمة الترجمة

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين، وبعد.

أردت أن أبدأ هذه المقدمة بتعريف موجز للطاقة، لكني اكتشفت أن العثور على تعريف مناسب، رغم بساطته الظاهرية، أمر بالغ التعقيد. فكثير من مشاهير العلماء، ومنهم فينمان، أقروا بصعوبة وصف الطاقة لأننا بكل بساطة نجهل حقيقتها. لكن الثابت، كما أكد لنا أينشتاين في معادلته الشهيرة، أن المادة ما هي إلا طاقة كامنة، وأنها تتجسد بأشكال لاحصر لها يرتبط بعضها ببعض من خلال تحولات كونية موجودة في كل مكان، سواء أكانت مستمرة أم مؤقتة.

لا جدال في أن الطاقة عصب الحياة، فالحياة لا يمكن أن تستمر من دونها، بل هي العنصر الذي يتحكم بمقدرات الأمم والدول في عصرنا الحالي، وهي التي تقف وراء كثير من النزاعات الدولية والاتفاقيات والتحالفات التي نراها ماثلة أمامنا في عالم اليوم. فإذا أمعنا النظر في أسباب كثير من الحروب التي اندلعت في مختلف أنحاء العالم في العصر الحديث وجدنا أن الطاقة هي اليد الخفية التي تحركها وتؤجج أوارها. والأمثلة على ذلك كثيرة في التاريخ

المعاصر لاسيما الأحداث التي شهدتها منطقة الشرق الأوسط في السنوات الأخيرة. وليس هذا غريباً نظراً لما تحويه هذه المنطقة من كميات هائلة من موارد الطاقة الأحفورية مثل النفط والغاز الطبيعي. فالقوى العظمى لا تتورع عن خوض حروب مدمرة دامية تزهق ملايين الأرواح وتحرق الأخضر واليابس في سبيل الحصول على الطاقة والسيطرة على مصادرها.

وكتاب «تاريخ الطاقة والحضارة» الذي أضع ترجمته بين أيدي القراء اليوم إسهام كبير في استعراض تاريخ الطاقة بأشكالها كافة وصورها وأثرها في الحضارة الإنسانية منذ أقدم العصور وحتى يومنا هذا، منذ أن كانت وليدة جهد عضلي يبذله الإنسان والحيوان بهدف أداء أعمال معينة تعين الإنسان على الاضطلاع بأعباء حياته اليومية مثل الصيد أو جمع الثمار. ويحكي المؤلف قصة انتقال الإنسان القديم من الحياة الرعوية القائمة على جمع الثمار والأعشاب إلى ممارسة الزراعة، لاسيما زراعة الحبوب والبقوليات التي أسهمت فيما بعد في انتقاله إلى حياة الاستقرار والتخلي عن حياة الترحال. ويبين المؤلف أن مصدر الطاقة كان عضلات الإنسان قبل أن يتمكن من تدجين حيوانات الجر وتسخيرها قبل كل شيء في حراثة الأرض. ويعزو المؤلف التطور المبكر في الزراعة إلى اختراع المحراث الخشبي أولاً ومن بعده المحراث الآلي وبقية الآلات الزراعية التي اخترعت تباعاً. ويبين المؤلف أن لكل مرحلة مميزة من مراحل التطور الحضاري نقطة انعطاف مهمة محورها الطاقة، مثل استخدام طاقة الرياح في تحريك السفن الشراعية، والطاقة المائية في الطواحين والعنفات المولدة للكهرباء، والطاقة البخارية التي استخدمت في المحركات والقطارات، والكهربائية التي تمخضت عن اختراع المصابيح والمحركات، والطاقة الأحفورية التي استعملت في محركات الاحتراق الداخلي، والطاقة النووية المستخدمة اليوم في المفاعلات النووية.

ويتتبع المؤلف المسار التاريخي الذي سلكته الحضارات عبر القرون المتعاقبة والدور الحيوي الذي لعبته الطاقة في أثناء تطورها عبر القرون، فيسند ذلك التطور إلى سعي الإنسان سعياً حثيثاً نحو السيطرة على مخازن الطاقة وسلاسلها على اختلاف أنواعها، ويقول إن الطاقة هي السبب المباشر في التقدم الاجتماعي، لأنها وثيقة الارتباط بشؤون بني البشر كافة؛ لذا كان اعتماد الإنسان على موارد الطاقة استمراراً حتمياً لتطور حضارته؛ فموارد الطاقة في رأي أوستفالد هي التي تحدد كمية العمل، والتحكم بسلاسل الطاقة هذه يحدد قوة الإنسان ومدى تأثيره في الطبيعة.

ونجد في هذا الكتاب أيضاً عرضاً لدور الطاقة في تطوير الزراعة واستصلاح الأراضي في مناطق مختلفة من العالم، ولدورها في تطور الصناعة في أوروبا وأمريكا إثر اكتشاف الحديد وبناء الأفران العالية لصهره وتحويله إلى الفولاذ. كما يتتبع الكتاب تطور النقل البري والبحري منذ البدايات، فيحكي قصة اختراع الدراجة الهوائية والمحركات والقطارات البخارية، ومحركات الاحتراق الداخلي، والمحركات الكهربائية، ثم ينتقل إلى النقل البحري مبيناً أنواع السفن الشراعية وتسخيرها لطاقة الرياح في الإبحار عبر المحيطات ما مهد السبيل أمام الاكتشافات الجغرافية. ويتحدث المؤلف بإسهاب عن تزويد تلك السفن بالمدافع إثر اختراع البارود ثم الديناميت الذي كان نقطة تحول كبرى في الحروب.

وأفرد المؤلف جزءاً كبيراً من كتابه لاختراع الكهرباء والمصباح الكهربائي والمولدات الكهربائية باستعمال العنفات المائية أو الغازية وتوليد الكهرباء بالاستفادة من طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وينتهي الكتاب الشائق بعرض للطاقة والمفاعلات النووية التي يمكن أن تساعد في الحصول على الطاقة الكهربائية النظيفة الخالية من التلوث، لكنه في الوقت ذاته يشير إلى المخاطر التي تنطوي عليها تلك المفاعلات ويضرب مثالاً على ذلك ما حدث في كارثة تشيرنوبيل عام 1986.

ويؤكد المؤلف أن انتقال الطاقة على المستويات كافة حدد عبر التاريخ كثيراً من المفاهيم لدينا؛ فعلى مستوى الكون نجد أن الخواص الأساسية تخضع لطاقة الجاذبية التي تتحكم بالمجرات والنجوم، وهي التي تبقي كوكبنا في مداره على مسافة ثابتة من الشمس، وتبقي الغلاف الجوي حول الأرض وهو ما يجعلها صالحة للحياة. أما الشمس فتحافظ على قدرتها الحرارية بفضل استمرار الاندماج النووي على سطحها. وفي كوكبنا نستطيع أن نرى كيف يتحول جزء من الطاقة الإشعاعية في الطبيعة إلى طاقة كيميائية تعرف بعملية التركيب الضوئي الضرورية لاستمرار الحياة.

صحيح أن هذا الكتاب يحمل عنوان «*تاريخ الطاقة والحضارة*»، لكنه في الحقيقة يستحق أن يكون موسوعة الطاقة والحضارة لغزارة معلوماته ودقة موضوعاته. فهو بحق فيض من المعلومات والإحصاءات وضعت في ترتيبها الزمني وعرضت فوائدها وإسهاماتها في الحضارة الإنسانية بدقة وموضوعية. فهو بحق كتاب لا غنى عنه لكل من يبحث في قصة الحضارة الإنسانية وينشد ارتقاء سلم التقدم العلمي. وأنا على يقين من أن القارئ سيستمتع بقراءته بقدر ما استمتعت أنا بترجمته.

المترجم

محمد زياد يحيى كبة

الفصل الأول
الطاقة والمجتمع

الطاقة هي العملة الكونية الوحيدة، بمعنى أنه لا بد من تحويل أحد أشكالها المتعددة إذا ما أردنا إنجاز أي عمل من الأعمال. وتتراوح مظاهر هذه التحولات الكونية من دوران المجرات الهائل إلى التفاعلات النووية الحرارية في النجوم. أما على الأرض، فتتراوح هذه التحولات بين قوى الصفائح التكتونية التي تشكل طبقات الأرض وتفصل قيعان المحيطـات، وتشكِّل سلاسل جبلية جديدة، إلى تراكم تأثير الحت الذي تحدثه قطرات المطر الصغيرة. وكما أدرك قدماء الرومان فإن نقطة الماء لا تحفر الصخر بقوتها، بل بديمومتها[1]. فالحياة على وجه البسيطة التي لا تزال الوحيدة التي نعرفها في هذا الكون، بعد عشرات السنين من محاولات التقاط إشارة ذات معنى من العوالم الخارجية، ستكون مستحيلة من دون عملية التركيب الضوئي التي تحول الطاقة الشمسية إلى كتلة نباتية (الكتلة الحيوية النباتية). فبقاء البشر يعتمد على هذا التحول، مثلما يعتمد وجودهم الحضاري على الكثير من سلاسل الطاقة. وفي هذا الشأن قال ريتشارد آدامز Richard Adams م(1982، 27):

> صحيح إن بوسعنا إطلاق العنان لأفكارنا، لكنها تبقى مجرد أفكار في غياب الوسائل التي تحولها إلى عمل... ومع أن التاريخ يعمل بطرائق لا يمكن التكهن بها، لا بد لأحداثه من اتخاذ بنية أو تنظيمات تتواءم مع مكوناتها النشطة.

ومع تطور المجتمعات البشرية تزايدت أعداد السكان تزايداً كبيراً، كما زاد تعقيد التنظيمات المجتمعية والإنتاجية، وارتفع مستوى المعيشة لدى الكثير من الناس. فمن منظور فيزيائي حيوي، يمكن رؤية تطور الإنسان في مرحلة ما قبل التاريخ والأحقاب التاريخية المتتالية على أنه سعي للسيطرة على مخازن الطاقة الهائلة وسلاسلها المركزة على اختلاف أنواعها وتحويلها بطرائق يسيرة، زهيدة التكلفة، عالية الكفاءة إلى حرارة وضوء وحركة. وقد عمم ألفرد لوتكا Alfred Lotka م(1880-1949)، عالم الكيمياء والرياضيات والإحصاء الأمريكي، هذا التوجه في قانونه الخاص بالطاقة القصوى، حيث قال: «في كل مثال بحثنا فيه، وجدنا أن الانتخاب الطبيعي يسهم في زيادة الكتلة

الإجمالية للنظام العضوي لرفع معدل دوران المادة في النظام، وزيادة إجمالي تدفق الطاقة فيه ما دامت هناك بقايا من مادة لم تستخدم، وطاقة في متناول اليد» (لوتكا، 1922، 148).

هذا هو مسار تاريخ الحضارات المتعاقبة بما فيها أكبر مخلوقات الغلاف الحيوي وأشدها تعقيداً. ولعلنا نرى في اعتماد الإنسان على سلاسل أعلى من الطاقة استمراراً حتمياً لتطور المخلوقات الحية. لقد كان فيلهلم أوستفالد Wilhelm Ostwald م(1853- 1932)، الحائز جائزة نوبل في الكيمياء لعام 1909 عن بحوثه في مجال الوسائط الكيميائية، أول عالم يوسع صراحة «القانون الثاني في الطاقة ليطال كل عمل، وأي عمل، بحيث يشمل سائر الأعمال البشرية... لكن ما كل صنوف الطاقة جاهزة لهذا التحول، لأنه يقتصر على أشكال بعينها تدعى بالطاقات الحرة... فالطاقة الحرة إذن هي رأس المال الذي تستهلكه سائر المخلوقات على اختلاف أنواعها، وبتحوله يتحقق كل شيء» (أوستفالد 1912، 83). وقد مكنه هذا من وضع صيغة النهي الخاص بالطاقة: «لا تهدر الطاقة، بل استفد منها»[2] (أوستفالد 1912، 85).

ثمة اقتباسات ثلاثة تبين كيف صاغ أتباع أوستفالد نتائجه من جديد، وكيف جعل بعضهم الرابطة بين الطاقة وسائر شؤون بني البشر واضحة تمام الوضوح. ففي أوائل السبعينيات من القرن الماضي قدّم هاورد أودم Howard Odum م(1924-2002) صيغة أخرى من قانون أوستفالد نصت على أن: «توافر موارد الطاقة يحدد كمية العمل، كما أن التحكم بسلاسل الطاقة هذه يحدد قوة الإنسان ومدى تأثيره النسبي في الطبيعة» (أودم 1971، 43). وفي أواخر الثمانينيات من القرن الماضي، وضع رونالد فوكس Ronald Fox كتاباً عن دور الطاقة في التطور جاء فيه: «كل تحسن في ربط دفق الطاقة رافقه تحسن في الآليات الثقافية» (فوكس 1988، 166).

وليس من الضروري أن يكون المرء من العلماء ليربط بين كمية الطاقة والتقدم الاجتماعي. فهاهو إريك بلير Eric Blair (جورج أورويل George Orwell، م1903-1950) يكتب في عام 1937 في الفصل الثاني من *الطريق إلى ويغان بير The Road to Wigan Pier* بعد زيارته منجمَ فحم حجري تحت الأرض:

> إن حضارتنا، (مع الاعتذار لتشسترتون [3]Chesterton])، تعتمد على الفحم اعتماداً كـاملاً يعجز المرء عن إدراكه. فالآلات التي تبقينا على قيد الحياة، والآلات التي تصنع الآلات كلها تعتمد على الفحم اعتماداً مباشراً أو غير مباشر. وفي عملية تحول العالم الغربي لا أحد يفوق عامل المناجم أهمية اللهم إلا من يفلح الأرض. إنه كتمثال الكرتيد[4] الذي يحمل على منكبيه تقريباً كل ما لا يكسوه السخام الأسود. لذلك فإن عملية استخراج الفحم تستحق المشاهدة إن سنحت لك الفرصة وكنت مستعداً لتجشم هذا العناء. (أورويل، 1937، 18).

غير أن إعادة التشديد على تلك الرابطة الجوهرية (كما فعل أورويل) شيء، والادعاء بأن ثمة تحسينات ثقافية رافقت كل تحسن في معدل دفق الطاقة (كما يفعل فوكس) شيء آخر. فالنتيجة التي خلص إليها أورويل لا استثناء فيها. أما عبارة فوكس فهي تكرار لوجهة النظر الحتمية التي طرحها عالم الأنثروبولوجيا لزلي وايت Leslie White م(1900-1975) قبل جيلين حيث قال إنها أول قانون مهم يتناول التطور الثقافي: «مع تساوي الأشياء الأخرى، فإن درجة التطور الثقافي تتباين على نحو يرتبط مباشرة بمقدار الطاقة المُسَخَّر والموجه للعمل لكل فرد سنوياً» (وايت 1943، 346). صحيح أن صيغة أوستفالد الأساسية، أو أثر الطاقة في كل ما يتعلق ببنية المجتمعات المتطورة وديناميكيتها (pace Orwell)، موضوعات لا تقبل الجدل، إلا أن حتمية ارتباط مستوى استخدام الطاقة بالمنجزات الثقافية مسألة جدلية إلى حد كبير. وسوف أبحث في هذه السببية (أو غيابها) في الفصل الأخير من هذا الكتاب.

إن الطبيعة الجوهرية للمفهوم لا يرقى إليها الشك، كما يقول روبرت ليندساي Robert Lindsay م(1975، 2):

لو عثرنا على كلمة واحدة لفكرة تنطبق على كل عنصر في الوجود بحيث نحس بأننا نستوعبه استيعاباً حقيقياً، لحققنا إنجازاً اقتصادياً قوياً. هذا ما حدث للفكرة التي تعبر عنها كلمة طاقة؛ إذ لم يسبق لمفهوم آخر أن وحد فهمنا للتجربة على هذا النحو.

لكن ما هي الطاقة؟ من الغريب أنه حتى الفائزون بجائزة نوبل يجدون صعوبة كبيرة في إعطاء إجابة شافية عن هذا السؤال رغم بساطته الظاهرية. فقد أكد ريتشارد فينمان Richard Feynman م(1918-1988) في كتابه الشهير *محاضرات في الفيزياء Lectures on Physics* أن «من الأهمية بمكان في الفيزياء اليوم أن ندرك أننا نجهل ما هي الطاقة، وأننا لا نملك صورة لها بوصفها كتلاً صغيرة ذات كمية محددة» (فينمان 1988، 4-2).

إن ما نعرفه يبين لنا أن المادة بصورها كافة هي طاقة في حالة سكون[5]، وأن الطاقة تتجسد بأشكال عدة، وأن أشكال الطاقة تلك يرتبط بعضها ببعض من خلال تحولات عديدة كثير منها تحولات كونية موجودة في كل مكان، ومستمرة، وأخرى محلية، متقطعة، ومؤقتة (الشكل 1-1). لقد توسع فهم هذه المخازن، والإمكانات والتحولات توسعاً سريعاً، واكتسب شكلاً منتظماً بلغ أوجه في القرن التاسع عشر، واكتملت هذه المعرفة في القرن العشرين (نظرياً في أواخر الثلاثينيات من القرن الماضي، وعملياً في عام 1943 مع بدء العمل في أول مفاعل ذري) حين فهمنا - وهذا تعليق على مدى تعقيدات تحولات الطاقة له معناه - كيف نحرر الطاقة النووية قبل أن نعرف آلية عمل التركيب الضوئي (لم تكتشف سلاسل هذه الظاهرة إلا في الخمسينيات).

كهربائية	**حركية**	**حرارية**	**نووية**	**كيميائية**	**كهرومغناطيسية**	من / إلى
الإشعاع الكهرومغناطيسي	الشحنات المتسارعة	الإشعاع الحراري	القنابل النووية	التألق الكيميائي		***كهرومغناطيسية***
التحليل الكهربائي	الفصل بالتحليل الإشعاعي	الغليان		المعالجة الكيميائية	التركيب الضوئي	**كيميائية**
					مفاعلات غاما - النيوترونية	**نووية**
التسخين بالمقاومة	الاحتكاك	التبادل الحراري	الانشطار الاندماج	الاحتراق	الامتصاص الشمسي	**حرارية**

المحركات الكهربائية المسننات التمدد النشاط الاستقلاب مقاييس الإشعاع **حركية**

الحراري الإشعاعي

الاحتراق القنابل
الداخلي النووية

مولدات الكهرباء الكهرباء الحرارية البطاريات النووية خلايا الوقود البطاريات الخلايا الشمسية **كهربائية**

الشكل 1-1

مخطط تحولات الطاقة. في حال وجود المزيد من الاحتمالات، لم يذكر أكثر من تحولين رئيسين.

تدفق الطاقة وتخزينها والتحكم بها

للطاقة بأشكالها المعروفة كافة أهمية بالغة لوجود الإنسان، وهذه الحقيقة تحول من دون ترتيبها بحسب أهميتها. فعملية انتقال الطاقة، سواء على مستوى الكون أو الكوكب، ومن خلال مظاهرها المحلية أو الإقليمية، حددت عبر التاريخ كثيراً من المفاهيم ورسمت أبعادها. فالسمات الجوهرية في الكون تخضع لطاقة الجاذبية التي تتحكم بعدد لانهاية له من المجرات والنجوم. كما أن الجاذبية تبقي على كوكبنا في مداره على مسافة ثابتة من الشمس وتمسك بغلاف جوي هائل الحجم وهذا ما يجعل الأرض صالحة لحياة الإنسان (المربع 1-1).

وكما هي الحال في سائر النجوم النشطة، تستمد الشمس قدرتها من الاندماج (النووي)[6]، كما أن نتاج هذه التفاعلات الحرارية النووية يصل الأرض على هيئة طاقة كهرطيسية (شمسية، شعاعية). ويغطي تدفق هذه الطاقة طيفاً واسعاً من أطوال الموجات بما فيها الضوء المرئي. وتعكس الغيوم والسطوح نحو 30% من هذا التدفق الهائل، في حين يمتص الغلاف الجوي والغيوم 20% منه. أما الباقي، وهو نصف الدفق تقريباً، فتمتصه المحيطات والقارات، وتحوله إلى طاقة حرارية تنطلق مرة أخرى في الفضاء على هيئة إشعاع (سميل 2008أ). أما الطاقة الحرارية الجوفية فتجتمع لتشكل دفقاً حرارياً أقل بكثير: فهي تنتج من تعاظم الجاذبية الأصلية لكتلة الكوكب ومن اضمحلال (تحلل) المواد المشعة، وتعمل على تحريك نشاطات تكتونية هائلة تعيد تشكيل المحيطات والقارات وتسبب الزلازل والاندفاعات البركانية.

ولا يتحول سوى جزء ضئيل (أقل من 0.05٪) من الطاقة الإشعاعية الواردة من التركيب الضوئي إلى مخازن جديدة للطاقة الكيميائية في النبات تشكل أساساً لا غنى عنه لسائر صنوف الحياة العليا. وتعيد عملية التمثيل الغذائي عند الكائنات الحية تنظيم المواد الغذائية في هيئة نسج نامية، وتحافظ على الوظائف الجسمانية ودرجة الحرارة الثابتة في سائر الأنواع العليا. كما تولد عملية الهضم الطاقة الميكانيكية (الحركية) للعضلات العاملة. أما عملية تحويل الطاقة عند الحيوانات فترتبط ارتباطاً أصيلاً بحجم أجسامها وغذائها. ومن العوامل الأساسية المميزة لنوعنا البشري تلاشي هذه الحدود المادية

المربع 1-1

جاذبية الأرض وصلاحيتها لسكن الإنسان

تتحدد معدلات التحمل الفائقة في عملية الاستقلاب القائمة على الكربون تبعاً لدرجة تجمد الماء على اعتبار أن عملية تشكل الجزيئات العضوية وتفاعلاتها (الحد السفلي) تحتاج إلى الماء وهو في حالته السائلة، كما تتحدد تبعاً لدرجات الحرارة والضغط التي تزعزع استقرار الأحماض الأمينية وتفكك البروتينات (الحد العلوي). ومن الملحوظ أن المنطقة المصلحة للسكن الدائم على سطح الأرض - أي نصف قطر المدار الذي يضمن الظروف المثلى لكوكب يدعم الحياة - ضيقة جداً (بيركنز Perkins 2013). وقد دلت حسابات أجريت مؤخراً على أننا أقرب إلى الحد ما كنا نعتقد حيث خلص كوبارابو Kopparapu وفريقه (2014) إلى نتيجة مفادها أن الأرض، بتركيبها وضغطها الجوي، تسلك مداراً يقع على الحافة الداخلية للمنطقة المصلحة للسكن، أي على الحافة الخارجية مباشرة لنصف القطر الذي يولد فيه تأثير الدفيئة الجامح درجات حرارة عالية لاتحتمل.

وقبل نحو بليون سنة امتصت المحيطات ووحيدات الخلية والطحالب كميات من ثاني أكسيد الكربون تكفي لدرء هذا التأثير عن الأرض، ولو كان الكوكب أبعد بنسبة 1% عن الشمس لانحبس كل ماء الأرض في كتل جليدية. وحتى لو كانت درجات الحرارة ضمن النطاق المثالي، فإن كوكب الأرض يبقى عاجزاً عن توفير مقومات الحياة على اختلاف أنواعها من دون غلافه الجوي الفريد الذي يتألف أساساً من النيتروجين، ويثريه الأكسجين الناتج عن عملية التركيب الضوئي، بالإضافة إلى مقادير ضئيلة من الغازات التي تضبط حرارة السطح - ولولا الجاذبية القوية الناتجة عن ضخامة حجم الكوكب لما بقي هذا الغلاف الجوي الرقيق في مكانه.

بسبب زيادة كفاءة العضلات وتسخير الطاقات الخارجة عن أجسامنا.

ولما تحررت هذه الطاقات الخارجة عن الجسم بفضل الذكاء البشري استُخدمت في إنجاز مختلف المهام بوصفها وسائط تحريك أولية قوية ووقوداً يولد الحرارة عند احتراقه. أما آليات إطلاق الطاقة هذه فتعتمد على دفق المعلومات وعلى عدد كبير من الآلات المختلفة. وتتراوح هذه الأجهزة من أدوات بسيطة مثل أحجار الطَرْق والعتلات إلى محركات الاحتراق الداخلي والمفاعلات الانشطارية التي تولد الطاقة. ويسهل وضع التسلسل التطوري والتاريخي لهذه التطورات في إطار نوعي عريض. وكما هي حال الكائنات الحية التي لا تعتمد على التركيب الضوئي، تعد الحاجة إلى الغذاء أهم احتياجات الطاقة البشرية الأساسية. فالبحث عن العلف والطعام عند جماعات الهومينيد (الإنسان البدائي) يشبه إلى حد بعيد عملية الحصول على الطعام عند أجدادها من الرئيسات. صحيح أن بعض الرئيسات -وأيضاً بعض الثدييات (بما فيها ثعالب الماء والفيلة)، وبعض الطيور (مثل الغراب والببغاء) وحتى بعض اللافقاريات (مثل رأسيات الأرجل)- طورت مجموعة صغيرة من القدرات على استعمال الأدوات (هانزل Hansell 2005؛ سانز Sanz كول Call وبوش Boesch 2014؛ الشكل 1-2) لكن جماعات الإنسان البدائي فقط هي التي اتخذت من صنع الأدوات علامة مميزة لسلوكها.



الشكل 1-2

شيمبانزي (بان تروغلودايتس Pan Troglodytes) في الغابون يستعمل الأدوات في كسر الثمار (كوربيز).

لقد منحتنا الأدوات ميزة ميكانيكية في الحصول على الطعام والمساكن والملابس. كما أدى استئناس النار إلى توسعة مساحة السكن وزيادة الفجوة بيننا وبين الحيوانات مثلما أدت الأدوات الجديدة إلى تسخير الحيوانات الأليفة، وبناء آلات معقدة تعمل بالطاقة العضلية، وإلى تحويل جزء يسير من الطاقات الحركية التي تولدها الرياح والماء إلى قوة مفيدة. صحيح أن وسائط التحريك الأولية هذه ضاعفت القوة التي كانت في متناول البشر، لكن استخدامها ظل لمدة طويلة من الزمن محدوداً بطبيعة الدفق المتوافر وشدته. ويتجلى هذا بوضوح في الأشرعة، التي كانت أدوات فعالة، لكن قدرتها ظلت لآلاف السنين رهن الرياح وتيارات المحيط السائدة. لقد ساعدت هذه التيارات الهائلة على توجيه الرحلات الأوروبية عبر الأطلسي المتجهة إلى البحر الكاريبي في أواخر القرن الخامس عشر، لكنها كذلك كانت حجر عثرة أعاقت اكتشاف الإسبان لهاواي مع أن السفن التجارية الإسبانية المعروفة بغلايين مانيلا[7] Manila Galleons (جمع غليون) كانت تمخر عباب المحيط الهادي مرة أو مرتين في العام من المكسيك (أكابولكو) إلى الفيليبين على مدى 250 عاماً بين 1565 و1815 (شورتز Schurz م1939).

كما أتاح التحكم بعمليات الاحتراق في المدافئ والمواقد والأفران تحويل طاقة النبات الكيميائية إلى طاقة حرارية. وقد استخدمت هذه الحرارة مباشرة في المنازل، وصهر المعادن، وشيّ الطوب وفي معالجة عدد لاحصر له من المنتجات وإعدادها بشكلها النهائي. أما إحراق الوقود الأحفوري فزاد استعمال الحرارة التقليدية المباشرة انتشاراً وكفاءة. لقد كان لعدد من الاختراعات الجوهرية دور مهم في تحويل الطاقة الحرارية الناتجة عن الوقود الأحفوري إلى طاقة ميكانيكية. وتحقق هذا أول الأمر في المحركات البخارية ومحركات الاحتراق الداخلي، ومن ثم في

العنفات (التوربينات) الغازية والصواريخ. فمنذ عام 1882 ونحن نولد الكهرباء من حرق الوقود الأحفوري والاستفادة من طاقة الماء الحركية، وصرنا نحصل عليها من انشطار أحد نظائر اليورانيوم منذ عام 1956.

لقد أوجد احتراق الوقود الأحفوري وتوليد الكهرباء نوعاً جديداً من حضارة الطاقة العليا التي انتشرت على نطاق واسع شمل الكوكب بأسره حتى أصبحت مصادر الطاقة الأولية التي يوفرها الآن على صغرها مصادر متجددة سريعة النمو لاسيما الطاقة الشمسية (التي تولدها أجهزة كهربائية – ضوئية photovoltaic devices أو خلايا الطاقة الشمسية solar power plants) أو الرياح (التي تتحول بوساطة عنفات - توربينات - هوائية ضخمة). وبدورها كانت صنوف التقدم هذه متوقعة بفضل سلسلة من التطورات الأخرى. وقياساً على أنموذج الدفق فقد تحتم إنشاء مجموعة من البوابات (الصمامات) وتفعيلها بالترتيب الملائم الذي يجعل دفق العبقرية البشرية ممكناً.

من أبرز البوابات المطلوبة لإطلاق احتياطيات الطاقة الهائلة توافر الفرص التعليمية اللازمة، والترتيبات القانونية المعروفة مسبقاً، والقواعد الاقتصادية الشفافة، وتوافر رأس المال المناسب، والشروط المواتية للبحث الأساسي. لذلك ليس غريباً أن يستغرق السماح لسلاسل الطاقة المضاعفة أو المطورة نوعياً باستغلال المصادر الجديدة للطاقة على نطاق واسع وقتاً طويلاً. وتتزايد صعوبة التنبؤ بالتوقيت، والقدرة الشاملة، وتركيب سلاسل الطاقة الناتجة. وخلال المراحل الأولية من هذه المراحل الانتقالية نرى أن من المستحيل تقييم جميع التأثيرات النهائية للمحركات الأولية وقواعد الوقود على الزراعة، والصناعة، والنقل، والمستوطنات، والحروب، وبيئة الأرض. وتعد التفسيرات الكمية ضرورية لتقدير القيود المفروضة على أعمالنا وتتطلب معرفة بالمفاهيم والمقاييس العلمية الأساسية.

المفاهيم والمقاييس

تقف مبادئ أولى عديدة وراء سائر عمليات تحويل الطاقة. فمن الممكن تحويل كل شكل من أشكال الطاقة إلى حرارة أو طاقة حرارية من دون أن تضيع أيّ كمية من الطاقة في أي من عمليات التحويل هذه. فتحويل الطاقة، وهذا أول قوانين الديناميكا الحرارية، هو من أهم الحقائق الكلية الجوهرية. لكن إمكانية الحصول على عمل مفيد تتضاءل مع تحركنا على امتداد سلاسل التحويل (المربع 1-2). هذه الحقيقة الجارفة تعرف بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية، كما أن الأنتروبيا هي مقياس الطاقة المختص بضياع الطاقة المفيدة هذا. ومع أن محتوى الكون من الطاقة ثابت، إلا أن تحويلات الطاقة تزيد الإنتروبيا (أي تقلل مدى فائدته). فسلة القمح أو برميل النفط كلاهما مخزن طاقة منخفض الأنتروبيا قادر على أداء كثير من العمل المفيد حين يتم استقلابه أو إحراقه، وينتهي به المطاف بأن يكون حركة عشوائية لجزيئات هواء مسخنة قليلاً، وهي حالة من الأنتروبيا العالية غير مرتجعة تمثل ضياع فائدة لايمكن استعادتها.

ويؤدي هذا التبدد أحادي الجهة في المحتوى الحراري الأنتروبي إلى ضياع التعقيد وإلى اضطراب وتجانس أكبر في أي نظام مغلق. لكن سائر الكائنات الحية، بدءاً بأصغر نوع من البكتيريا وانتهاء بالحضارة الكونية، تتحدى بصورة مؤقتة هذا التوجه من خلال استيراد الطاقة وتعبئتها. وهذا يعني وجوب أن يكون كل كائن حي نظاماً مفتوحاً يحافظ على دفق وارد ودفق خارج من الطاقة والمادة. وما دامت هذه النظم حية فإنها لا تستطيع أن تكون في حالة كيميائية وديناميكية - حرارية متوازنة (بريغوجين Prigogine م1947، 1961؛ فون بيرتلانفي Bertalanffy م1968؛ هايني Haynie م2001). وتتمخض الأنتروبيا السلبية - من حيث نموها وتجددها وتطورها - عن قدر أكبر من التجانس وتزايد التعقيد البنيوي والنظامي. وكما هي الحال في ضروب عديدة من التقدم العلمي، فإن فهم هذه الحقائق فهماً مترابطاً لم يتحقق إلا في القرن التاسع عشر حين وجدت العلوم سريعة التطور مثل الفيزياء، والكيمياء، والأحياء اهتماماً مشتركاً في دراسة تحولات الطاقة (أتوتر Atwater ولانغورذي Langworthy م1897؛ كاردول Cadwell م1971؛ ليندساي Lindsay م1975؛ مولر Müller م2007؛ أوليفيرا Oliveira م2014؛ فارفوغليس Varvoglis م2014).

هذه الاهتمامات الجوهرية كانت بحاجة إلى ترميز في هيئة مقاييس موحدة. وقد شاع استخدام وحدتين في قياس **الطاقة:** (الحريرة) الكالوري، وهي وحدة مترية، والوحدة الحرارية البريطانية (Btu). واليوم يعد الجول وحدة القياس العلمية الأساسية للطاقة، والكلمة مستمدة من اسم عالم الفيزياء البريطاني جيمس بريسكوت جول James Prescott Joule م(1818 - 1889) الذي نشر أول حسابات دقيقة لمعادل العمل والحرارة (المربع 1-3). أما **الاستطاعة (القدرة)** Power فتعني معدل تدفق الطاقة، وأولى وحداتها القياسية، وهي الحصان البخاري، كانت من وضع جيمس واط James Watt م(1736 - 1819) الذي أراد أن يتقاضى ثمن محركاته البخارية وفق أسس يسهل فهمها فوقع اختياره على مقارنة واضحة بالمحرك الأول الذي حلت محله، وهو الحصان الذي يستعمل في إدارة الطواحين أو المضخات. (الشكل 1-3، المربع 1-3).

المربع 1-2

تضاؤل الاستفادة من الطاقة المتحولة

إن أي تحول للطاقة يوضح المبدأ. فإذا كان ثمة قارئ أمريكي يستخدم مصباحاً كهربائياً ليضيء هذه الصفحة، فإن الطاقة الكهرطيسية لذلك الضوء ليست سوى جزء يسير من الطاقة الكيميائية الموجودة في تلك الكتلة من الفحم المستعملة في توليدها (في عام 2015 كان الفحم يستخدم في توليد 33% من الكهرباء في الولايات المتحدة). ويضيع 60% على الأقل من طاقة الفحم على شكل حرارة تنطلق من مداخن المصانع ومن تبريد الماء، وإذا كان القارئ يستعمل أحد المصابيح المتوهجة القديمة، فإن أكثر من 95% من الكهرباء المنتجة ينتهي على شكل حرارة متولدة من مقاومة المعدن في السلك الشعري الملفوف داخل المصباح للتيار الكهربائي. أما الضوء الذي يصل إلى الصفحة فإما أن تمتصه الصفحة أو ينتثر على الأشياء المجاورة لها فتمتصه وتطلقه بالإشعاع على شكل حرارة. وهكذا يتبدد الدخل منخفض المحتوى الحراري الأنتروبي من طاقة الفحم الكيميائية على شكل حرارة عالية المحتوى الحراري سخنت الهواء فوق المحطة والأسلاك، وحول المصباح، وأدت إلى ارتفاع غير محسوس في درجة الحرارة فوق صفحة. صحيح أننا لم نفقد أي كمية من الطاقة، لكن شكلاً مفيداً جداً من أشكالها اضمحل حتى أصبح عديم الجدوى من الناحية العملية.

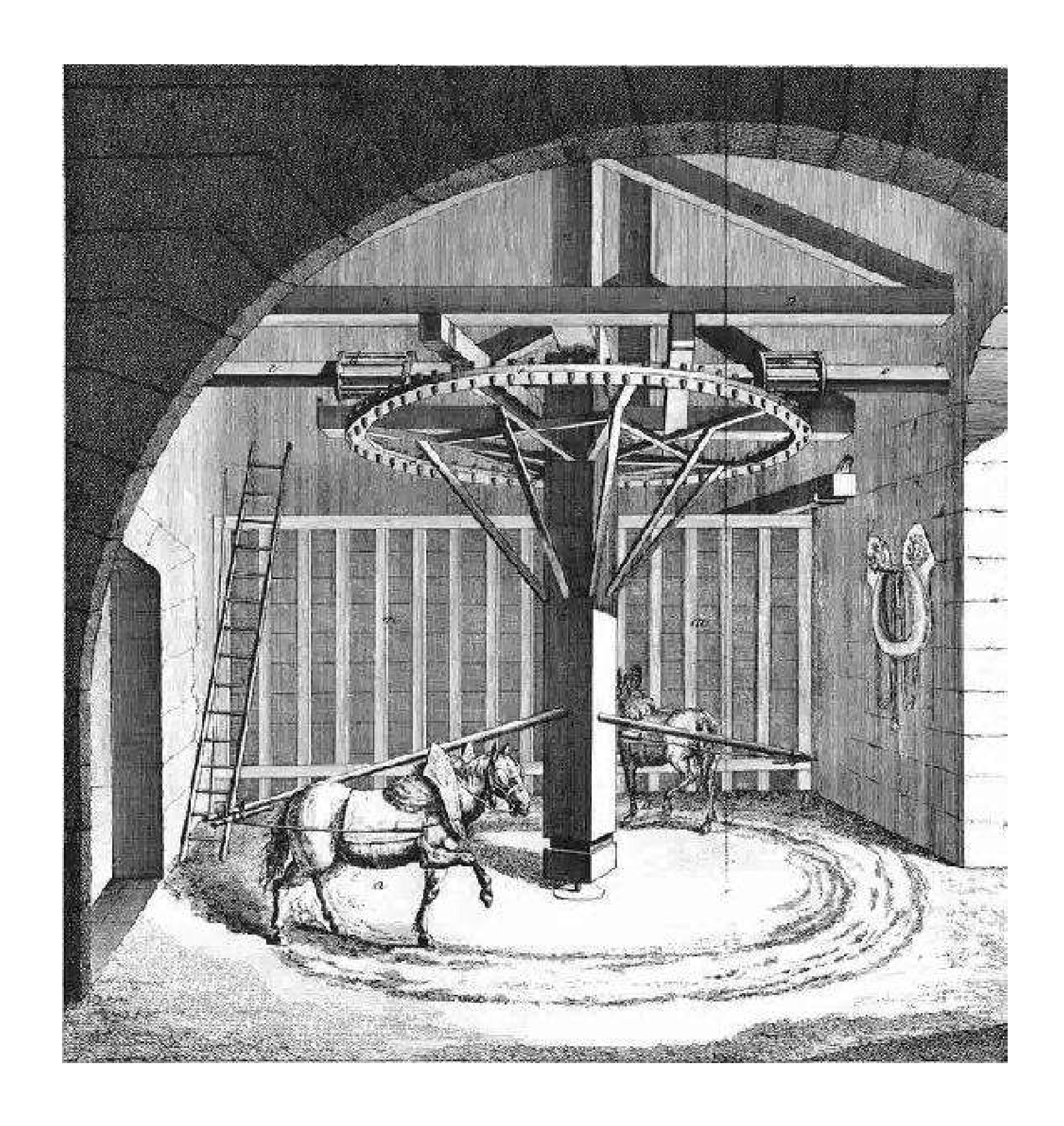
المربع 1-3

قياس الطاقة والقدرة

ينص التعريف الرسمي للجول على أنه يساوي مقدار الشغل المبذول عندما تؤثر قوة مقدارها نيوتن واحد في جسم يتحرك مسافة متر باتجاه تلك القوة. ويمكن أيضاً تعريف وحدة الطاقة الأساسية من خلال المستلزمات الحرارية. فالحريرة (كالوري واحد) هي كمية الحرارة اللازمة لرفع حرارة 1 سم 3 من الماء درجة مئوية واحدة. وهي كمية ضئيلة من الطاقة. ويتطلب فعل الشيء عينه بكمية 1 كغ من الماء ألف ضعف من الطاقة، أو كيلوحريرة (للاطلاع على لائحة كاملة بالسوابق الصرفية الخاصة بالمضاعفات انظر «المقاييس الأساسية» في الملاحق). وإذا أخذنا في اعتبارنا معادلات الحرارة والعمل، صار كل ما نحتاجه لتحويل الحريرات إلى جول هو أن نتذكر أن الحريرة الواحدة تساوي تقريباً 4.2 جول. هذا التحويل بسيط أيضاً بالنسبة إلى المقياس الإنجليزي غير المتري، أي الوحدة الحرارية البريطانية التي تحتوي على 1000 جول (أو 1.055 على وجه الدقة). ويعد متوسط الحاجة اليومية إلى

الطعام من المعايير المقارنة الجيدة. فهو بالنسبة إلى غالبية البالغين من ذوي النشاط المتوسط يتراوح بين 2 و2.7 ميغا حريرة أو نحو 8-11 ميغا جول، ومن الممكن الحصول على 10 ميغا جول بأكل 1 كغ من خبز القمح.

في عام 1782 قدر جيمس واط في كتابه *الوصم والحساب Blotting and Calculation* أن حصان الطاحون يعمل بمعدل 32.400 قدم - باوند بالدقيقة، وفي السنة التالية قرب هذا الرقم إلى 33.000 قدم - باوند (دكنسون Dickinson 1939م) كما قدر متوسط سرعة المشي بنحو 3 أقدام بالثانية الواحدة، لكننا لا نعرف من أين جاء برقمه الذي يقدر متوسط الجر بنحو 180 باوند. صحيح أن بعض الحيوانات الضخمة كانت قوية إلى ذلك الحد، لكن معظم خيل القرن الثامن عشر لم يكن بوسعها الحفاظ على معدل حصان واحد. واليوم تساوي وحدة القياس القياسية، أي الواط الواحد، تدفق جول واحد بالثانية. كما يساوي الحصان البخاري الواحد نحو 750 واط (745.699 على وجه الدقة). أما استهلاك 8 ميغا جول من الطعام يومياً فيعادل 90 واط (8 ميغا جول/24 سا x 3.600م ثا) أي أقل من معدل مصباح ضوئي (100 واط). وتستهلك آلة تحميص الخبز المزدوجة 1.000 واط أو 1 ك واط؛ كما تولد السيارات الصغيرة نحو 50 ك واط؛ أما محطة تعمل بالفحم أو محطة نووية لتوليد الكهرباء فمعدل إنتاجها 2 جيغا واط.



الشكل 1-3

حصانان يقومان بتدوير عمود رحوية يضخ الماء من البئر في مصنع سجاد فرنسي في منتصف القرن الثامن عشر (مقتبس من الموسوعة [ديدرو Diderot ودالمبير d'Alembert م1769-1772]). ولم يكن باستطاعة الحصان العادي آنذاك الحفاظ على معدل عمل ثابت يعادل حصاناً بخارياً واحداً. لقد استعمل جيمس واط تقديراً مبالغاً فيه ليضمن رضا الزبائن عن محركاته البخارية التي تقدر استطاعتها بالحصان البخاري بهدف إحلالها محل الحيوانات المستخدمة في تحريك الآلات.

ومن المعدلات المهمة الأخرى **كثافة الطاقة**، وتعني كمية الطاقة لكل وحدة كتلة من المصدر (المربع 1-4). ولهذه القيمة أهمية كبرى للمواد الغذائية: فحتى حين تتوافر الأغذية ذات الكثافة منخفضة الطاقة بكميات زائدة فإنها

لا تشكل مواد غذائية رئيسة. فعلى سبيل المثال، كان السكان في حوض المكسيك قبل قدوم الإسبان يتناولون ثمار التين الشوكي دائماً، إذ كان من السهل جمعها من أنواع الصبار الكثيرة من فصيلة الشوكيات Opuntia (ساندرز Sanders، بارسونز Parsons، وسانتلي Santley م1979). لكن، وكما هي الحال في معظم الثمار، فإن الماء يشكل لب الثمرة الشوكية (نحو 88%) في حين تشكل المواد الكربوهيدراتية أقل من 10%، والبروتينات 2%، والدهنيات 0.5%، أما كثافة طاقتها فلا تتعدى 1.7 ميغا جول/كغ (فيوغانغ Feugang

المربع 1-4

كثافات الطاقة الخاصة بالمواد الغذائية والوقود

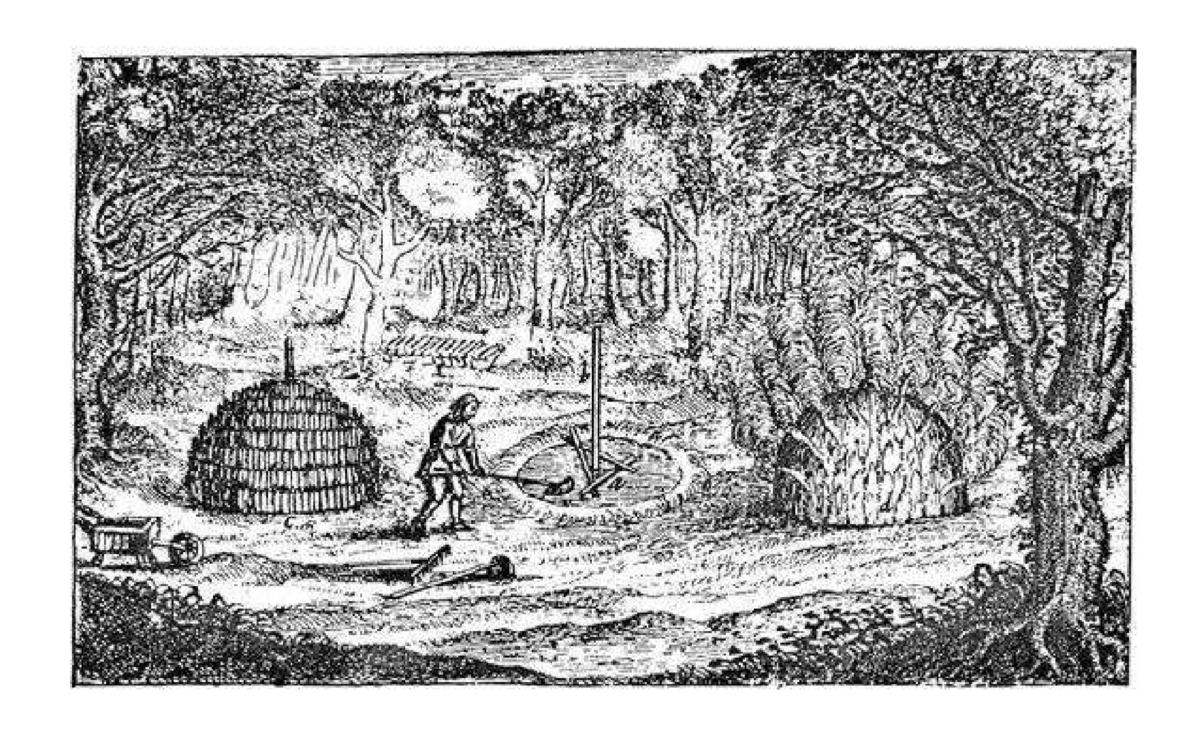
كثافة الطاقة (ميغاجول/كغ)	الأمثلة	الترتيب
		المواد الغذائية
0.8- 2.5	الخضر، الفاكهة	منخفضة جداً
2.5- 5.0	الدرنات، الحليب	منخفضة
5.0- 12.0	اللحوم	متوسطة
12.0- 15.0	الحبوب ودقيق الخضر	مرتفعة
25.0- 35.0	الزيوت، دهون حيوانية	مرتفعة جداً
		الوقود
	فحم المستنقعات	منخضة جداً
5.0- 10.0	خشب أخضر، عشب	
	بقايا المحاصيل،	منخفضة

12.0- 15.0	خشب مجفف بالهواء	
17.0- 21.0	خشب جاف	متوسطة
28.0- 32.0	الفحم، الفحم الصلب	مرتفعة
40.0- 44.0	الزيوت الخام	مرتفعة جداً

المصدر: كثافات الطاقة النوعية الخاصة بالمواد الغذائية كما وردت في ميريل Merill وواط Watt م(1973)، جنكنز Jenkins م(1993) ووزارة الزراعة الأمريكية USDA م(2011).

وآخرون 2006)، وهذا يعني أن امرأة صغيرة الحجم تقتات بالمواد الكربوهيدراتية المستخلصة من التين الشوكي (ولنفترض جدلاً أنه لا حاجة إلى المادتين الضئيلتين الأخريين) عليها أن تتناول 5 كغ من الثمار يومياً - مع أن بوسعها الحصول على كمية الطاقة ذاتها من نحو 650 غ من دقيق الذرة الذي يستهلك على شكل أرغفة التورتية tortillas أو الطامال tamales (طعام مكسيكي معد من دقيق الذرة).

كثافة القدرة هي معدل إنتاج الطاقة أو استهلاكها في وحدة المساحة وبذلك تكون عاملاً حيوياً بنيوياً محدِّداً لنظم الطاقة (سميل 2015 ب). فعلى سبيل المثال، يعتمد حجم المدينة في سائر المجتمعات التقليدية على الخشب والفحم، وكان واضحاً أن انخفاض كثافة إنتاج الكتلة النباتية (المربع 5-1، الشكل 1-4) تحد من نمو حجم المدن. وتقدر كثافة القدرة الخاصة بالنمو السنوي المستدام في المناطق المعتدلة بنحو 2% كم من كثافة القدرة الخاصة باستهلاك الطاقة للتدفئة التقليدية في المدن، والطبخ، والصناعة ما حتم على المدن الاعتماد على مناطق مجاورة مساحتها أكبر منها بثلاثين



الشكل 1-4

صناعة الفحم في إنجلترا في أوائل القرن السابع عشر كما وردت في كتاب Silva لـ جون إيفلين (1607).

المربع 1-5

كثافات القدرة في الوقود النباتي

تحول عملية التركيب الضوئي أقل من 0.5 ٪ من الطاقة الشمسية الواردة إلى وقود نباتي جديد، ولا يتجاوز معدل إنتاجية أفضل أنواع وقود الخشب من الفصائل التقليدية سريعة النمو (الحور، شجر الكافور، والصنوبر) 10 طن/هكتار، أما في المناطق الجافة فتتراوح المعدلات بين 5 و10 طن/هكتار (سميل 2015 ب). وعلى اعتبار أن متوسط كثافة الخشب الجاف هي 18 جيغا جول/طن فإن حصاد 10 ط/هكتار يتحول إلى كثافة قدرة تصل إلى 0.6 واط/م2: (10ط/هكتار x م18 جيجا جول)/3.15 x م107 (ثوان في سنة واحدة) = ~ 5,7.8 واط، 5,7.8 واط / 10,000 م^2 (هكتار) = 0.6 واط/م^2.. فمدينة كبيرة من مدن القرن الثامن عشر كانت تحتاج إلى 20 - 30 واط/م^2 من مساحة بنائها للتدفئة، والطبخ والصناعات الحرفية، وبالتالي لابد أن تكون مساحة مصدر خشب الوقود أكبر من مساحتها بثلاثين إلى خمسين ضعفاً على الأقل.

إلا أن المدن كانت بحاجة إلى كميات كبيرة من الفحم، لكونه الوقود الوحيد الذي لا يطلق الدخان في العصر ما قبل الصناعي والذي كان مفضلاً لدى سائر الحضارات التقليدية لأغراض التدفئة الداخلية، كما أن صنع الفحم كان يؤدي إلى المزيد من الضياع الكبير في الطاقة. وحتى في منتصف القرن الثامن عشر كان معدل الفحم - الخشب

المعهود لا يزال عالياً عند 1:5، وهذا يعني في تعبيرات مصطلحات الطاقة (في الخشب الجاف عند 18 جيجا جول/طن والفحم [وهو من الكربون النقي] عند 29 جيجا جول/طن)، أن مردود هذا التحول يقرب من 30% (18مxم5/ 29 = 0.32). أما كثافة ما يتم جمعه من الخشب المخصص لإنتاج الفحم فلم تتجاوز 0.2 واط/م^2. من هنا كانت المدن الكبيرة في العصر ما قبل الصناعي في المناطق ذات المناخ الشمالي المعتدل التي تعتمد على الفحم (مدينة زي آن أو بيجين الصينيتان هما من الأمثلة الجيدة) بحاجة إلى مناطق حراجية تزيد مساحتها مساحة تلك المدن بمئة ضعف على الأقل لضمان استمرار توفير ذلك الوقود.

مرة للحصول على ما تحتاجه من الوقود. هذا الواقع قلص نمو هذه المدن بصرف النظر عن توافر الموارد الأخرى مثل الطعام والماء.

وثمة معدل آخر اكتسب أهمية كبيرة مع تطور الحضارة ألا وهو **مردود تحويلات الطاقة**، حيث يصف معدل المخرجات/المدخلات أداء محولات الطاقة، سواء أكانت مواقد الطبخ، أو المحركات، أو مصابيح الإنارة. صحيح أننا عاجزون عن فعل أي شيء إزاء ضياع المحتوى الحراري (الأنتروبي)، لكن بوسعنا تحسين مردود المحولات بتخفيض كمية الطاقة المطلوبة لأداء مهمات بعينها (المربع 1-6)، ولدينا قيود أساس (ديناميكية حرارية وميكانيكية) مفروضة على هذه التحسينات. لقد رفعنا مردود بعض العمليات إلى مستوى قريب من المردود العملي، مع أن الفرصة لا تزال سانحة لتحقيق مزيد من التحسينات في معظم الحالات بما فيها محولات الطاقة مثل محركات الاحتراق الداخلي والمصابيح.

يطلق على حساب مردود إنتاج المواد الغذائية (الطاقة في الغذاء/ الطاقة في المدخلات لزراعتها)، أو أنواع الوقود، أو الكهرباء عادة مصطلح **عائدات الطاقة**. ويجب أن يكون صافي عائدات الطاقة في كل زراعة تقليدية تعتمد حصراً على القدرة الحيوانية أكبر من واحد بكثير: فمن الضروري أن تحتوي الغلال المصلحة للطعام على طاقة تفوق الطعام أو العلف الذي يستهلكه الناس والحيوانات من منتجي هذه الغلال مثلما تفوق حاجة أفراد أسرهم غير المنتجين. وتبرز عقبة كأداء حين نحاول أن نقارن عائدات الطاقة في الزراعات التقليدية التي كانت تدار حصراً بالطاقة الحيوانية (وبالتالي فهي لا تشمل سوى تحولات الإشعاع الشمسي الذي وصلنا مؤخراً) بعائدات الزراعة الحديثة التي تتلقى الدعم بشكل مباشر (الوقود لعمليات الحقل) وغير مباشر (صنوف الطاقة اللازمة لتركيب الأسمدة والمبيدات ولبناء الآلات الزراعية) بحيث تقل عائداتها من الطاقة بلا استثناء عن عائدات الزراعة التقليدية (المربع 1-7).

وأخيراً، تقيس **شدة الطاقة** كلفة المنتجات والخدمات وحتى مجموع المخرجات

المربع 1-6

تحسينات المردود وتناقض جيفونز Jevons

حقق التقدم التقني منجزات كثيرة تستحق الإعجاب في مجال رفع المردود، ويعد تاريخ الإنارة واحداً من أفضل الأمثلة (نوردهاوس Nordhaus م1998؛ فوكيه Fouquet وبيرسون Pearson م2006). فالشموع تحول ما لا يزيد على 0.01 من الطاقة الكيميائية في الشحم الحيواني أو الشمع إلى ضوء. أما مصابيح إديسون Edison التي اختُرعَت في ثمانينيات القرن التاسع عشر فبلغ مردودها عشرة أضعاف تقريباً. وبحلول عام 1900 لم يكن مردود محطات توليد الكهرباء التي تعمل بإحراق الفحم أكثر من 10%؛ كما لم تستطع المصابيح الكهربائية أن تحول أكثر من 1% من الكهرباء إلى ضوء وبذلك كان نحو 0.1% من طاقة الفحم الكيميائية يتحول

إلى ضوء (سميل 2005). ويبلغ مردود أفضل المحطات التي تعمل بالعنفات الغازية متحدة الشوط combined cycle (التي تستعمل الغاز الساخن الخارج من عنفة غازية في توليد بخار لتدوير عنفة بخارية) نحو 60%، في حين يبلغ مردود مصابيح الفلوريسنت نحو 15%، مثلها مثل الديودات المولدة للضوء (وزارة التعليم الأمريكية USDOE م2013). وهذا يعني أن نحو 9% من الطاقة في الغاز الطبيعي تتحول في النهاية إلى ضوء، ويمثل هذا المردود زيادة قدرها 90% عما كان عليه في أواخر الثمانينيات من القرن التاسع عشر. وقد سمحت هذه الزيادة بتوفير رأس المال وتكاليف التشغيل وخفضت من الأذى الذي يلحق بالبيئة.

لكن رفع مردود التحويل في الماضي لم يؤد بالضرورة إلى توفير فعلي في الطاقة. ففي عام 1865 بيّن ستانلي جيفونز Stanley Jevons م(1835 - 1882)، وهو خبير اقتصادي إنجليزي، أن تبني محركات بخارية أكفأ تصحبه زيادة كبيرة في استهلاك الفحم، وخلص إلى نتيجة تقول «إن المسألة كلها لاتعدو كونها خلطاً في الأفكار التي تفترض أن الاقتصاد في استعمال الوقود يعني خفض الاستهلاك. لكن العكس هو الصحيح. فالقاعدة تنص على أن الأشكال الجديدة في الاقتصاد ستؤدي إلى زيادة الاستهلاك بحسب مبدأ معترف به في كثير من الأمثلة الموازية» (جيفونز 1865، 140). وقد ثبت هذا الواقع في العديد من الدراسات (هرنغ Herring م2004، 2006؛ بوليميني Polimeni وآخرون 2008)، لكن في المجتمعات المرفهة حيث اقترب استعمال الطاقة من حد الإشباع، أو بلغه فعلاً، نرى أن التأثير آخذ في الضعف. نتيجة لذلك، كثيرًا ما تكون الارتدادات التي يمكن عزوها إلى كفاءة أعلى عند مستوى المستخدم النهائي صغيرة وتقل مع الوقت، والارتدادات المحددة على نطاق الاقتصاد ربما تكون تافهة بل وحتى شكلية (جولدستايت Goldstein، مارتينيه Martinez وروي Royم2011).

الاقتصادية في وحدات الطاقة القياسية - وكلفة الطاقة ذاتها. ومن بين المواد شائعة الاستعمال نجد أن الألومنيوم والمواد البلاستيكية عالية من حيث شدة الطاقة في حين أن الزجاج والورق رخيصا التكلفة نسبياً، أما الخشب (عدا كلفة التركيب الضوئي) فهو أفقر المواد الشائعة من حيث شدة الطاقة (المربع 1-8). لقد جلب التقدم التقني في القرنين الماضيين كثيراً من التراجع في شدة الطاقة. ولعل من أبرز مظاهر هذا التقدم الآن انخفاض الطاقة المستخدمة في عملية صهر الحديد الخام باستعمال فحم الكوك في أفران الصهر الضخمة بنسبة 10% لكل وحدة كتلة من المعدن الساخن عما كان يحتاجه إنتاج الحديد الخام باستعمال الفحم قبل العصر الصناعي (سميل 2016).

لا تُعد كلفة الطاقة من الطاقة (تسمى عادة عائد الطاقة على الاستثمار [8]EROI[])، مع أن التعبير الأدق هو عائد الطاقة على استثمار الطاقة [9]EROEI[]) مقياساً ذا دلالة إلا عند مقارنة القيم التي حسبت بطرائق متماثلة باستخدام فرضيات قياسية وحدود تحليلية معرّفة جيداً . ولقد فضلت المجتمعات الحديثة عالية الطاقة تطوير مصادر الوقود الأحفوري صاحب أعلى نسبة من صافي عائدات الطاقة، ويعد هذا سبباً أساساً لتفضيل النفط الخام بصفة عامة وحقول الشرق الأوسط الغنية على نحو خاص. فكثافة الطاقة العالية للنفط، وبالتالي سهولة نقله، ميزات واضحة أخرى (المربع 1-9).

تعقيدات ومحاذير

يعد استعمال الوحدات القياسية في قياس مخزونات الطاقة وتدفقها عملية مباشرة فيزيائياً ولا غبار عليها علمياً - لكن هذه التخفيضات في العامل المشترك مضللة أيضاً. وفوق هذا وذاك، لا يمكنها وصف الفوارق النوعية المهمة بين مختلف أنواع الطاقة. فقد يكون نوعان من الفحم متماثلين من حيث كثافة الطاقة، لكن أحدهما يمكن أن يحترق احتراقاً نظيفاً من دون أن يترك نتيجة الاحتراق سوى قدر ضئيل من الرماد، في حين أن احتراق الآخر قد يطلق دخاناً كثيفاً وكمية كبيرة من ثاني أكسيد

المربع 1-7

مقارنة لعائدات الطاقة في إنتاج الطعام

منذ بداية السبعينيات من القرن الماضي استخدمت معدلات الطاقة في بيان أسبقية الزراعة التقليدية وتدني عائدات الزراعة الحديثة من الطاقة. لكن مثل هذه المقارنات مضللة بسبب فارق أساس بين المعدلين. فتلك الخاصة بالزراعة التقليدية ليست سوى محصلات طاقة الطعام التي جمعت في المحاصيل وطاقة الطعام والعلف اللازمة لإنتاج تلك المحاصيل بوساطة جهد البشر والحيوان. وفي المقابل، يتألف المعيار في الزراعة الحديثة بشكل أساسي من مدخلات وقود أحفوري لا يمكن تعويضه تغذي آلات الحقل وتستعمل في صنع الآلات والمواد الكيميائية الزراعية. أما مدخلات العمل فمهملة.

ولو حسبت المعدلات بوصفها نسبة مخرجات الطاقة المصلحة للأكل إلى مخرجات العمل، لبدا لنا أن النظم الحديثة، بكميتها الضئيلة من الجهد البشري، ومن دون حيوانات جر، أعلى مرتبة من أي ممارسة تقليدية. ولو شملت كلفة إنتاج محصول حديث كل الوقود الأحفوري المتحول والكهرباء المتحولة إلى عامل مشترك (مخرج الكسر) common denominator لكانت عائدات الطاقة في الزراعة الحديثة أقل من العائدات التقليدية بكثير. ومن الممكن إجراء مثل هذا الحساب بسبب معادل الطاقات الفيزيائي حيث يمكن التعبير عن الطعام والوقود كليهما بوحدات متماثلة. لكن تبقى هناك مشكلة الخلاف بين نقيضين إذ ليس ثمة وسيلة مرضية ومباشرة وبسيطة لمقارنة عائدات الطاقة لنظامي زراعة يعتمدان على نوعين من مدخلات الطاقة يختلفان اختلافاً جوهرياً.

الكبريت ويترك كمية كبيرة من المخلفات غير القابلة للاحتراق. لقد كان الفحم كثيفُ الطاقة والمثالي لتشغيل المحركات البخارية (لاحظوا أن وصف هذا الفحم بأنه «عديم الدخان» تعبير نسبي) عاملاً رئيساً أسهم في سيطرة بريطانيا على النقل البحري في القرن التاسع عشر على اعتبار أنه لا فرنسا ولا ألمانيا كانتا تملكان مصادر فحم ضخمة من نوعية مماثلة.

المربع 1-8

كثافات الطاقة لبعض المواد الشائعة

العملية	كلفة الطاقة (ميغا جول / كغ)	المادة
معدن من البوكسيت	175 - 200	الألمنيوم
يشوى من الطين	1 - 2	الإسمنت
من الفلز	90 - 100	النحاس

من مواد خام	10 - 70	المتفجرات
من مواد خام	4 - 10	الزجاج
بالحفر	<1	الحصى
من فلز الحديد	12 - 20	الحديد
من خشب الأشجار	1 - 3	الخشب
من خشب الأشجار	23 - 35	الورق
من مواد كربوهيدراتية	60 - 120	البلاستيك
من خشب الأشجار	3 - 7	الخشب الرقائقي
بالحفر	<1	الرمل
من معادن الخردة	10 - 12	الفولاذ
من المقالع	<1	الحجر

المصدر: معطيات من سميل (2014 ب)

ولا تفرق وحدات الطاقة المجردة بين الوقود الحيوي المصلحة للأكل وغير المصلحة. فكتلتان متماثلتان من القمح والقش الجاف تحتويان عملياً على الكمية ذاتها من الطاقة الحرارية، لكن الإنسان لا يستطيع هضم القش الذي يتألف بالأساس من السليلوز ونصف السليلوز والخشبين[10]، في حين أن القمح (وفيه 70% مواد نشوية كربوهيدراتية وما يصل إلى 14% بروتين) مصدر ممتاز للمواد الغذائية الأساسية. كما أنها تخفي الأصل النوعي لطاقة الطعام، وهذه مسألة بالغة الأهمية للتغذية السليمة.

المربع 1-9

عائدات الطاقة واستثمار الطاقة

ثمة فوارق هائلة في نوعية الوقود الأحفوري وسهولة الوصول إليه: فهناك عروق رفيعة من الفحم قليل الجودة تقابلها طبقة سميكة من فحم البيتومين عالي الجودة الذي يستخرج من مناجم مفتوحة، وهناك حقول هيدروكربونية هائلة شرق - أوسطية مقابل آبار قليلة الإنتاج تحتاج إلى ضخ مستمر. ونتيجة لذلك نرى أن قيم عائد الطاقة على استثمار الطاقة EROEI تتباين تبايناً كبيراً - وربما تتغير نتيجة زيادة كفاءة تقنيات الاستخراج. والنسب التالية ما هي إلا مؤشرات تقريبية تبين الفوارق بين طرق الاستخراج والتحويل (سميل 2008 أ؛ ميرفي Murphy وهول Hall م2010). فبالنسبة إلى إنتاج الفحم تتراوح العائدات بين 10 و80، وبين 10 و100 بالنسبة إلى الزيت والغاز؛ أما بالنسبة إلى العنفات الهوائية الضخمة في أشد المناطق تعرضاً للرياح فتقترب من 20، لكنها على الأغلب أقل من 10؛ أما بالنسبة إلى الخلايا الكهرضوئية فلا تتجاوز 2؛ وفيما يخص الوقود العضوي الحديث (الإثينول والديزل العضوي) يصل المعدل إلى 1.5 على أحسن تقدير، لكن إنتاجها أدى إلى ضياع الطاقة أو انعدام الربح الصافي (عائد الطاقة على استثمار الطاقة يتراوح فقط بين 0.9 - 1.0).

وكثير من الأطعمة الغنية بالطاقة لا تحتوي على أي مواد بروتينية أو دهنية أو تحتوي على قدر يسير منها، وهاتان المادتان الغذائيتان ضروريتان لنمو الجسم نمواً طبيعياً والحفاظ عليه، وقد لا توافران أي مواد غذائية مجهرية - أي الفيتامينات والمعادن.

وثمة ميزات مهمة أخرى ضمن القياسات المجردة. فمن الواضح أن الوصول إلى مخازن الطاقة مسألة حيوية. ولخشب الساق والأغصان كثافة الطاقة ذاتها، لكن في غياب الفؤوس والمناشير الجيدة لم يكن بوسع الناس في كثير من المجتمعات في العصر ما قبل الصناعي إلا جمع الوقود من الأغصان. وما زالت تلك الطريقة هي المتبعة في أفقر المناطق في أفريقيا وآسيا حيث يقوم الأطفال والنساء بجمع الوقود النباتي الخشبي؛ كما أن شكله، وقابليته للنقل، مهمة أيضاً لضرورة حمل الحطب (الأغصان) على رؤوسهم إلى المنزل غالباً من مسافات بعيدة. وقد تكون سهولة الاستخدام وكفاءة التحويل عاملاً حاسماً في اختيار الوقود. فمن الممكن تدفئة المنزل بالحطب، أو زيت الفيول، أو الغاز الطبيعي، لكن مردود أفضل أفران الغاز يصل الآن إلى 97% أي إن كلفة تشغيلها أدنى من أي خيار آخر.

يتطلب إحراق القش في المواقد البسيطة استمرار إلقاء القش في حين يمكن لقطع الحطب الكبيرة أن تشتعل لساعات. أما الطبخ في الداخل من دون تهوية (أو بتهوية سيئة عبر فتحة في السقف) بإحراق الروث الجاف فيطلق دخاناً كثيفاً أكثر من إحراق الحطب الموسمي في موقد جيد، ويظل احتراق الوقود العضوي سبباً رئيساً للأمراض التنفسية في كثير من البلدان الفقيرة (ماك غراناهان McGranahan ومري Murray م2003؛ بارنز Barnes م2014). ولا يمكن لكثافات الطاقة أو تدفقاتها أن تفرق بين الطاقات الأحفورية والمتجددة لنظام طاقة بعينه إلا إذا تحددت أصولها. فالحضارة الحديثة وجدت بفضل إحراق صنوف الوقود الأحفوري بكميات كبيرة ومتزايدة، لكن من الواضح أن هذه الممارسة محدودة بتوافرها في القشرة الأرضية وبالنتائج البيئية لإحراق الفحم والهيدروكربونات، ولا تستطيع المجتمعات الغنية بالطاقة أن تضمن بقاءها إلا بالانتقال في نهاية المطاف إلى موارد غير أحفورية.

ويبرز مزيد من الصعاب لدى مقارنة تحولات الطاقة الحية وغير الحية. ففي الحالة الثانية لا يعدو الأمر كونه معدل مدخلات الوقود أو الكهرباء ومخرجات الطاقة المفيدة، أما في الحالة الأولى فينبغي عدم اعتبار الطعام اليومي (أو العلف) مدخل طاقة خاصة بالعمل البشري أو الحيواني لأن معظم تلك الطاقة مطلوب لعملية الاستقلاب الأساسي - أي دعم قيام الأعضاء الحيوية في الجسم بوظائفها والحفاظ على ثبات درجة حرارة الجسم - ويعمل الاستقلاب

الأساسي بصرف النظر عما إذا كان الناس أو الحيوانات في طور الراحة أم العمل. لذا ربما كان حساب صافي تكلفة الطاقة أفضل الحلول المرضية (المربع 1-10).

لكن حتى في المجتمعات الأبسط من مجتمعاتنا كان جزء كبير من العمل دائماً

المربع 1-10

حساب صافي تكلفة الطاقة الخاصة بالعمل البشري

ليس ثمة طريقة مقبولة كلياً للتعبير عن تكلفة طاقة العمل البشري، وربما كان حساب صافي تكلفة الطاقة أفضل الخيارات المطروحة. إنه استهلاك الشخص الواحد من الطاقة الزائدة عن الحاجة الوجودية التي لا بد من تلبيتها حتى في حالة عدم القيام بعمل. هذه المقاربة تسجل العمل البشري بالتكلفة التراكمية الفعلية للطاقة. فمجموع الطاقة المستهلكة هو ناتج ضرب معدل الاستقلاب الأساسي (أو في وضع الراحة) في مستوى النشاط البدني واستهلاك الطاقة التراكمية سيكون الفارق بين مجموع الطاقة المستهلكة ومعدل الاستقلاب الأساسي. فمعدل الاستقلاب الأساسي عند رجل بالغ وزنه 70 كغ سيكون نحو 7.5 ميغا جول/يوم، وعند امرأة وزنها 60 كغ سيكون نحو 5.5 ميغا جول/يوم. وإذا فرضنا أن العمل الشاق يرفع متطلبات الطاقة بنسبة 30%، كان صافي تكلفة الطاقة للرجال نحو 2.2 ميغا جول/يوم و1.7 ميغا جول/يوم للنساء، لذلك سأستعمل 2 ميغا جول/يوم في سائر الحسابات التقريبية لصافي استهلاك الطاقة اليومية في تأمين الغذاء، والزراعة التقليدية، والعمل الصناعي.

يجب ألا يؤخذ الاستهلاك اليومي من الطعام على أنه مدخل الطاقة الخاصة بالعمل: فالاستقلاب الأساسي (لدعم الأعضاء الحيوية، وجريان الدم، والحفاظ على درجة حرارة ثابتة للجسم) يعمل بصرف النظر عما إذا كنا في حالة العمل أو الراحة. وبفضل دراسات الفسيولوجيا العضلية، ولا سيما عمل أرتشيبولد في هيل Archibald V. Hill م(1886 - 1977 الحائز جائزة نوبل في الطب عام 1922) أمكن حساب مردود العمل العضلي (هيل 1922؛ ويب Whipp وفاسرمان Wasserman م1969). فصافي مردود القيام بحركات رياضية منتظمة يبلغ نحو 20%، وهذا يعني أن 2 ميغا /جول من الطاقة الاستقلابية لمهمة بدنية تنتج عملاً مفيداً بقيمة 400 كيلو جول / يوم. وسأستعمل هذه المقاربة في جميع الحسابات ذات العلاقة. وفي المقابل، استعمل كاندر Cander ومالانيما Malanima ووارد Warde م(2013) إجمالي استهلاك الطعام في مقارنتهم التاريخية لمصادر الطاقة. وافترضوا أن متوسط استهلاك الطعام سنوياً هو 3.9 جيجا جول / فرد وهو معدل لم يتغير بين عاميْ 1800 و2008.

ذهنياً أكثر منه بدنياً - بحيث يحدد كيفية أداء مهمة معينة أي كيفية تنفيذها بالقدرة المحدودة المتوافرة، كيفية تقليص نفقات الطاقة - والكلفة الاستقلابية للتفكير، حتى التفكير الشديد، ضئيلة للغاية إذا ما قورنت بالجهد العضلي العنيف. من ناحية أخرى، يتطلب التطور العقلي سنوات من اكتساب اللغة، والاندماج بالمجتمع، والتعلم بالتلقين وتراكم الخبرات، ومع تقدم المجتمعات، ازدادت متطلبات عملية التعلم هذه ومدتها الزمنية من خلال التدريس الرسمي والتدريب والخدمات التي صارت بحاجة إلى قدر كبير من مدخلات الطاقة غير المباشرة لدعم البنية التحتية المادية والخبرة البشرية.

لقد اكتملت الدائرة. سبق أن أشرت إلى ضرورة التقييمات الكمية، لكن الفهم الحقيقي للطاقة في التاريخ يتطلب أكثر من اختزال كل شيء إلى حسابات رقمية بالجول والواط ومعاملتها بصفتها تفسيرات تنطبق على كل شيء. لذا سوف أواجه التحديات بكلتا الطريقتين: سوف أشير إلى متطلبات وكثافات الطاقة والقدرة وأبين المردود المتحسن، لكنني لن أهمل كثيراً من السمات النوعية التي تقيد أو تعزز استخدامات بعينها للطاقة. وحيث إن مستلزمات الطاقة

الضرورية واستخداماتها تركت بصماتها العميقة في التاريخ فإنه لا يمكن تفسير كثير من التفاصيل والسلاسل والنتائج المترتبة على عوامل الحسم التطورية الأساسية إلا بالرجوع إلى الدوافع والتفضيلات البشرية والاعتراف بهذه الخيارات المدهشة والمستعصية ظاهرياً على التفسير والتي شكلت تاريخ حضارتنا.

الفصل الثاني
الطاقة في التاريخ القديم

إن البحث في فهم أصل النوع المعروف باسم homo (الإنسان) والوقوف على تفاصيل تطوره اللاحق من البحوث التي لا نهاية لها، إذ تُرجع الاكتشافات الجديدة الكثير من العلامات القديمة إلى أحقاب ما فتئت توغل في القِدم، وتزيد الصورة الشاملة تعقيداً مع اكتشاف أنواع لا تتطابق بسهولة مع الهرم الحالي (ترينكاوس Trinkaus م2005؛ ريونولدز Reynolds وجالاغر Gallagher م2012). في عام 2015 كان أقدم رفات لكائن قديم هو رفات ما يعرف باسم *أرديبيثوكوس راميدوس Ardipithecus ramidus* التي عثر عليها عام 1994 (وتعود إلى 4.4 مليون سنة) ورفات *أوسترالوبيثيكوس أنامنسيس Autralopithecus anamensis* (التي تعود إلى 4.1 - 3.5 مليون سنة، وعثر عليها في عام 1967). وقد أضيف إلى هذه المكتشفات اكتشاف مهم آخر دعي باسم *أسترالوبيثيكوس ديريميدا Australopithecus deyiremeda* م(3.3 - 3.5 مليون سنة) من إثيوبيا (هيلا - سيلاسي Haile Selassie et al. وآخرون 2015). أما السلسلة التي تتضمن أشباه البشر اللاحقين فتشمل *أسترالوبيثيكوس أفارنسيس Australopithecus afarensis* (اكتشفت عام 1974 في لاتولي بتانزانيا وهادار في إثيوبيا) ***وهومو هابيليس*** (الإنسان الماهر) ***homo habilis*** ***وهومو*** *إركتوس* (الإنسان المنتصب) *homo erectus* (الذي يعود إلى 1.8 مليون عام، وكثير من الاكتشافات الأخرى في أفريقيا وآسيا وأوروبا تعود إلى 250.000 عام).

لقد دلت إعادة تحليل أقدم عظام للإنسان العاقل *Homo sapien sapien* (اكتشافات ريتشارد ليكي Richard Leakey الشهيرة في إثيوبيا في عام 1967) على أنها تعود إلى ما يقرب من 190.000 عام (ماكدوغل McDougall، براون Brown وفليغل Fleagle). وهذا يعني أن أجدادنا الذين ننحدر منهم مباشرة كانوا كائنات بسيطة تجوب البراري بحثاً عن نباتات تقتات بها، وأن أولى مجموعات السكان التي ننتسب إليها لم تبدأ حياة الاستقرار إلا منذ 10.000 عام تقريباً إثر تدجين النبات والحيوان. وهذا يعني أن استراتيجيات البحث عن الطعام عند أشباه البشر بقيت لملايين السنين تشبه استراتيجيات أسلافهم من الرئيسات. أما اليوم فلدينا دلائل مستمدة من النظائر المشعة من شرق أفريقيا تفيد بأن النظام الغذائي عند أشباه البشر بدأ قبل 3.5 مليون عام في الابتعاد عن ذلك الذي لدى القرود. لقد بين سبونهايمر ومساعدوه (2013) أن أنواعاً عدة من أشباه البشر بدأت بعد ذلك الحين في إدخال أغذية مدعمة بالكربون 13 (الذي ينتج عن C4 أو استقلاب حمض الكراسولاسي crassulacean acid metabolism) في نظامها الغذائي، وله نظير من الكربون شديد التغير في تركيبه لا يماثل الثدييات الأفريقية. فالاعتماد على النباتات الغنية بمادة C4 من الممارسات الموغلة في القِدم. وفي الزراعة الحديثة نرى أن محصولي الذرة الصفراء وقصب السكر أغزر من كل المحاصيل الأخرى التي تزرع لحبوبها أو محتوياتها من السكر.

لذا فإن القفزة التطورية الأولى التي أدت في نهاية المطاف إلى ظهور نوعنا -الإنسان العاقل- لم تتمثل في كبر حجم المخ أو القدرة على صنع الأدوات، بل كانت المشي على القدمين. صحيح أن هذه المواءمة بعيدة الاحتمال من الناحية البنيوية، لكنها نتيجة بالغة الأهمية تعود بدايتها إلى ملايين السنين (يوهانسون Johnson م2006). ويعد بنو البشر الثدييات الوحيدة التي اعتادت السير منتصبة القامة (أما الحيوانات العليا الأخرى فلا تفعل ذلك إلا لماماً)، وبذلك يمكن أن نرى أن السير على القدمين هو المواءمة الحرجة التي حققت اختراقاً وجعلتنا بشراً في نهاية المطاف. ومع ذلك، فإن السير على القدمين -الذي هو في الأساس سلسلة من السقطات غير المكتملة- عملية غير مستقرة ومتقلقلة: «فسير الإنسان عمل لا يخلو من الخطورة. فمن دون توقيت بأجزاء الثانية يمكن للإنسان أن يسقط على وجهه مباشرة. فهو في كل خطوة يخطوها يسير على شفا كارثة» (نابيه Napier م1970، 165) هذا بصرف النظر عن أن السير على قدمين يعرضنا لإصابات عضلية - عظمية كما أنه يسبب أيضاً ظاهرة قلة العظم القديمة قدم التاريخ (حين تكون كثافة العظم أقل من المعدل الطبيعي)، وهشاشة العظام (لاتيمر Latimer م2005).

لقد طرحت إجابات كثيرة عن السؤال الواضح حول سبب السير على قدمين، وبعضها يبدو غير مقنع حسبما يذكر يوهانسون في إيجاز (2006). فالتظاهر بطول القامة بهدف إثارة فزع الوحوش المفترسة ما كان ليؤثر في الكلاب البرية أو الفهود المرقطة أو الضباع التي لا تخاف أنواعاً من الثدييات أضخم حجماً من الإنسان. أما الوقوف بقامة منتصبة للنظر من فوق الأعشاب الطويلة فما كان إلا ليجذب انتباه الوحوش المفترسة، كذلك الوصول إلى الثمار التي تحملها الأغصان القريبة ممكن من دون الاضطرار إلى التخلي عن الجري السريع على أربع؛ وبالمثل يمكن تبريد الجسم من خلال الخلود إلى الراحة في الظل والبحث عن الطعام خلال أوقات الصباح أو المساء الباردة. وهكذا نرى أن الإجابة المثلى تتمثل في الفوارق في صرف الطاقة الشامل (لفجوي Lovejoy م1988). فأشباه البشر، مثلها مثل غيرها من الثدييات، كانت تصرف معظم طاقتها في التزاوج، وتغذية الصغار، وضمان الأمان، فإذا كان السير بقامة منتصبة يساعد على أداء كل هذه الأعمال إذن لتبنته هذه المخلوقات.

ويذكر يوهانسون (2006، 2) أنه «لا يمكن للانتخاب الطبيعي أن يُنشئ سلوكاً مثل السير على قدمين، لكنه يستطيع أن يحابي السلوك بمجرد نشوئه». ومن زاوية أضيق، نرى أنه ليس من الواضح كيف يمكن للسير على قدمين أن يتيح ميزة حيوية - ميكانيكية كافية لدعم انتخابها على أساس تكلفة الطاقة المصروفة في المشي وحدها (ريتشموند وآخرون Richmond et al. م2001)، مع أن سوكول Sockol ورايخلن Raichlen وبونتزر Pontzer م(2007)، بعد قياس مصروف الطاقة لدى قردة الشيمبانزي التي تمشي والبشر البالغين، وجدوا أن كلفة المشي عند البشر أقل بنسبة 75% من المشي على أربع وعلى اثنتين عند الشيمبانزي. ويعود السبب إلى الفوارق الكيميائية الحيوية في التشريح وطريقة المشي، وقبل كل شيء إلى الورك الواسع واستطالة الساقين عند البشر.

لقد أطلق المشي على قدمين سلسلة من عمليات الضبط التطورية الهائلة (كينغدون Kingdon م2003؛ ملدروم Meldrum وهيلتون Hiltonم 2004). لقد مكنت القامة المنتصبة عند أشباه البشر إبقاء اليدين حرتين لحمل الأسلحة وأخذ الطعام إلى مواقع الجماعات بدلاً من استهلاكه في المكان. لكن السير على قدمين كان ضرورياً لنشوء المهارة باستعمال اليدين واستخدام الأدوات. وقد خلص هاشيموتو Hashimoto وفريقه (2013) إلى نتيجة مفادها أن عمليات التأقلم الكامنة وراء استعمال الأدوات تطورت في معزل عن تلك اللازمة لسير الإنسان على قدمين لأن لكل إصبع لدى الإنسان والقردة تمثيلاً منفصلاً في قشرة المخ الحركية - الحسية مماثل لانفصال الأصابع في اليد. لقد أوجد هذا القدرة على استخدام كل إصبع بشكل مستقل في عملية التحكم المعقدة التي يحتاجها استخدام الأدوات. لكن من المستحيل استخدام الجذع في توفير القوة اللازمة لتسريع اليد في أثناء صنع الأدوات واستخدامها من دون السير على قدمين. وبالمثل حرر السير على قدمين الفم والأسنان كي تطور نظام صيحات أشد تعقيداً كمتطلب سابق للغة (أيلو Aiello م1996). وتطلبت هذه التطورات أدمغة كبيرة بلغ مصروفها من الطاقة ثلاثة أضعاف مصروف الشيمبانزي، ويعادل سدس كامل معدل الاستقلاب الأساسي (فولي Foley ولي Lee م1991؛ لوين Lewinم 2004). إن متوسط حجم الدماغ (كتلة الدماغ الفعلية /كتلة الدماغ المتوقعة بالنسبة إلى وزن الجسم) هو 2- 3.5 عند الرئيسات وأوائل أشباه البشر، أما بالنسبة إلى الإنسان فيزيد قليلاً على 6. فقبل ثلاثة ملايين عام

كان لمخلوق أسترالوبيثيكوس أفارينسيس *Australopithecus afarensis* دماغ حجمه أقل من 500 سم^3؛ لكن هذا الحجم تضاعف قبل 1.5 مليون عام عند الإنسان المنتصب، ثم تزايد بنسبة 50% تقريباً عند الإنسان العاقل (ليناردLeonard ، سنودغراس Snodgrass، وروبرتسون Robertson م2007).

كانت الزيادة في حجم الدماغ بالغة الأهمية لنشوء التعقيد الاجتماعي (الذي رفع احتمالات البقاء على قيد الحياة وميَّز أشباه البشر عن بقية الثدييات) وكانت على علاقة وطيدة بالتغيرات في نوعية الطعام المستهلك. وتبلغ احتياجات الدماغ من الطاقة نحو 16 ضعف احتياجات عضلات الجسم، إذ يستهلك الدماغ 20 - 25% من الطاقة الاستقلابية في وضع الراحة، مقارنة بنسبة 8 - 10% عند بقية الرئيسات، وما لا يتجاوز 3-5% عند الثدييات الأخرى (هوليداي Holliday م1986؛ ليناردوآخرون 2003). كانت الطريقة الوحيدة للتعامل مع كبر حجم الدماغ والحفاظ على معدل الاستقلاب الشامل (الاستقلاب عند الإنسان في وضع الراحة لا يزيد على الاستقلاب عند بقية الثدييات من ذوات الكتلة ذاتها) هي تقليص كتلة الأنسجة الأخرى باهظة الاستهلاك من الناحية الاستقلابية. وذكر أيلو ويلر Wheeler م(1995) أن تقليص حجم القناة الهضمية كان الحل الأمثل لأن كتلة الأمعاء (على النقيض من القلب والكلى) تتفاوت إلى حد كبير تبعاً للنظام الغذائي.

لقد أكد فيش Fish ولوكوود Lockwood م(2003) وليناردـ سنودغراس وروبرتسون (2007) وهبلين Hublin وريتشاردز Richards م(2009) أن ثمة علاقة ارتباط إيجابية إلى حد كبير بين نوعية النظام الغذائي وكتلة الدماغ عند الرئيسات، وأن نوعية النظام الغذائي الأفضل لدى أشباه البشر، بما فيها اللحوم، دعمت أدمغة أكبر كانت حاجتها العالية من الطاقة تستمد جزئياً من انكماش القناة الهضمية (براون وآخرون 2010). وبينما نجد أن القولون يشكل 45% من كتلة أمعاء الرئيسات غير البشرية، وأن الأمعاء الدقيقة لا تشكل سوى 14 - 29% من تلك الكتلة، نرى أن هذه النسب معكوسة عند الإنسان حيث تشكل الأمعاء الدقيقة 56% والقولون 17-25%، وهذا دليل واضح على التأقلم مع أنواع الطعام عالي الجودة، كثيف الطاقة (مثل اللحوم والمكسرات) التي يمكن هضمها في الأمعاء الدقيقة. إن الزيادة في استهلاك اللحوم يساعد في تفسير مكتسبات الإنسان في كتلة الجسم والطول وصغر الفكين والأسنان (ماك هنري McHenry وكفينغ Coffing م2000؛ أيلو وولز Wells م2002). إلا أن الزيادة في استهلاك اللحوم لا يمكنها أن تغير أساس الطاقة عند أشباه البشر وهم في مرحلة التطور: ففي سعيهم لتأمين الطعام كان عليهم الاعتماد حصرياً على قوتهم العضلية وعلى طرائق بسيطة وحسب في عمليات جمع الثمار، والبحث عن الطعام، وصيد الحيوانات والأسماك.

إن تتبع أصل أولى الأدوات الخشبية (العصي والهراوات) عملية مستحيلة على اعتبار أن الأدوات الوحيدة التي حفظت في بيئة ناقصة الأكسجة، على الأغلب في المستنقعات، كانت قادرة على البقاء لفترات طويلة. فالتحلل لا يشكل معضلة بالنسبة إلى الأحجار الصلبة التي استخدمت في تشكيل الأدوات البسيطة، وقد دفعت المكتشفات الجديدة تاريخ أقدم الأدوات الحجرية المثبتة التي استخدمها أشباه البشر الأوائل إلى عصور مغرقة في القدم أكثر ما كان يعتقد من قبل. وعلى مدى عقود عدة أجمع الباحثون على أن أقدم الأدوات الحجرية تعود إلى نحو 2.5 مليون عام. هذه المطارق الحجرية الأولدوانية[11] بلبها البازلتي (لها وسط وأطراف)، والسواطير، والشظايا سهلت عملية ذبح الحيوانات وتكسير عظامها (دو لا تور de la Torre م2011). غير أن المكتشفات الأخيرة في موقع لوميكوي Lomekwi غربي توركانا في كينيا زادت في إبعاد التاريخ القديم لصنع الأدوات الحجرية إلى نحو 3.3 مليون عام (هارمند Harmand وآخرون 2015).

قبل نحو 1.5 مليون عام بدأت جماعات أشباه البشر تقطع شظايا حجرية أكبر حجماً من ذي قبل بغية صنع فؤوس يدوية مزدوجة، ومعاول مدببة، وسواطير مزدوجة غير مدببة (تعود إلى 1.2 - 0.1 مليون عام). كان كسر شظية حجرية من قلب واحد يعطي حواف حادة لا يتجاوز طولها 20 سم تستخدم في القطع، وكانت هذه الممارسات تنتج أنواعاً عدة من الأدوات المستعملة باليد (الشكل 2-1). كانت الرماح الخشبية أساسية في صيد الحيوانات الضخمة. ففي عام 1948 عثر على رمح كامل تقريباً داخل هيكل عظمي لفيل في ألمانيا يعود تاريخه إلى العصر الجليدي (115.000 - 125.000 عام) كما عثر في عام 1996 على رماح في منجم مفتوح للفحم الحجري في شونينغن

Schöningen يعود تاريخها إلى 400.000 - 380.000 عام (تيمه Thieme م1997) كما شدت الأسنة الحجرية إلى أنصال الرماح الخشبية بدءاً من نحو 300.000 عام.

لكن المكتشفات الجديدة في جنوب أفريقيا تشير إلى أن تاريخ صناعة الأدوات ذات المقبض متعددة الأجزاء أقدم ما كان يعتقد بنحو 200.000 عام: وخلص ويلكنز Wilkins وفريقه (2012) إلى نتيجة مفادها أن الأحجار المدببة من كاتو بان Kathu Pan، التي صنعت قبل 500.000 عام كانت رؤوساً للرماح. وقد ظهرت الأسلحة المقذوفة الحقيقية بعيدة المدى في أفريقيا قبل 90.000 - 70.000 عام (رودز Rhodes وتشيرتشل Churchill م2009). ويبين اكتشاف آخر في جنوب أفريقيا أن تقدماً تقنياً مهما - وهو إنتاج شفرات صغيرة (حجارة متناهية الصغر) من حجارة معالجة بالحرارة، لاستخدامها في صنع الأدوات المركبة - حدث قبل 71.000 عام وحسب (براون وآخرون 2012). وقد شاع استخدام الأدوات المركبة الكبيرة قبل 25.000 عام وحسب (العصر الغرافتياني Gravettian period في أوروبا) مع صنع القدّوم والفأس ذي النصاب (المقبض)، وقطع الحجر الصوان قطعاً أكفأ، والحصول على أدوات حادة؛ والحراب، والإبر، والمناشير، والخزفيات، والمصنوعات المنسوجة من الألياف (الملابس، والشباك، والسلال) التي تم اختراعها وتبنيها في تلك الفترة أيضاً.



الشكل 2-1

أدوات حجرية أشولينية، صنعها للمرة الأولى الإنسان العامل[12] Homo ergaster عن طريق انتزاع رقاقات حجرية لصنع شفرات حادة تستعمل في القطع.

كانت التقنيات المجدلينية (بين 17.000 و12.000 عام؛ تستمد تلك الحقبة اسمها من ملجأ صخري في لا مادلين La Madeleine جنوب فرنسا حيث اكتشفت تلك الأدوات) تنتج 12 م تقريباً من الرقاقات الحادة من قطعة حجر واحدة، وقد أظهرت التجارب التي أجريت على أدوات حديثة مماثلة (تم تثبيتها على نصال الأرماح) كم كانت فعالة في الصيد (بيتيون Pétillon وآخرون 2011). وقد أصبح الرمح ذو الرأس الحجري سلاحاً أقوى بعد اختراع قاذفات الأرماح في العصر الحجري المتأخر. فرمية قوية كان بإمكانها أن تضاعف سرعة السلاح بسهولة وتقلص ضرورة الاقتراب من الطريدة. كما أن السهام ذات الرؤوس الحجرية زادت من هذه الميزات ودقة التصويب.

لكننا لن نعرف أبداً تاريخ تطويع النار واستعمالها في التدفئة والطبخ: ففي الأماكن المفتوحة عملت الأحداث المتعاقبة على محو الأدلة في هذا الشأن، أما في الكهوف المسكونة فقد أزيلت تلك الأدلة بتعاقب الأجيال. لقد كان التاريخ المثبت لتطويع النار يوغل في القدم باستمرار: فالباحث غودزبلوم Goudsblom م(1992) يرى أنه حدث قبل 250.000 عام؛ وبعده باثني عشر عاماً أبعد غورن - إنبار Goren-Inbar وفريقه (2004) ذلك التاريخ إلى الوراء ليصل إلى 790.000 عام، في حين أن سجلات المستحاثات تبين أن استهلاك الطعام المطبوخ حدث قبل 1.9 مليون عام. لكن ما لاشك فيه أنه بحلول العصر الحجري الأعلى -أي منذ 30.000 إلى 20.000 عام حين حل الإنسان العاقل محل جماعات نياندرتال الأوروبية- كانت النار تستعمل على نطاق واسع (بار - يوسف Bar-Yosef م2002؛ كاركاناس Karkanas وآخرون 2007).

لطالما شكل الطبخ أحد المكونات المهمة في التطور البشري، لكن رانغام Wrangham م(2009) يرى أن تأثيره كان شديد الضخامة على أجدادنا لأنه أسهم في توسعة مدى نوعية الطعام المتوافر وجودته إلى حد كبير، ليس هذا وحسب، بل لأن تبني الطبخ أدخل كثيراً من التحولات البدنية (بما فيها صغر الأسنان وقصر الأنبوب الهضمي) وتعديلات سلوكية (مثل الحاجة إلى الدفاع عن مخازن الطعام المجموع الذي شجع على نشوء روابط الحماية بين الذكور والإناث) ما أدى فيما بعد إلى نشوء العلاقات الاجتماعية المعقدة، وحياة الاستقرار، و«الاستئناس الذاتي».
في عصور ما قبل التاريخ كان الطهو بأجمعه يتم على مواقد مكشوفة، حيث يعلق اللحم فوق اللهب، أو يطمر في الجمر المتوهج، أو يوضع على الصخور الساخنة، أو يغلف بجلد حيوان سميك ويغطى بالطين، أو يوضع مع حجارة ساخنة في قِرَب جلدية مليئة بالماء. وإزاء تنوع الأماكن والأساليب فقد بات من المستحيل معرفة مردود تحويل الوقود الأنموذجي. وتشير التجارب إلى أن 2-10% من طاقة الخشب تتحول في النهاية إلى حرارة مفيدة في الطبخ، كما أن ثمة افتراضاً معقولاً يبين أن الحد الأقصى لاستهلاك الخشب سنوياً هو 100-150 كغ/سنة للفرد الواحد (المربع 2-1).

وبالإضافة إلى التدفئة والطبخ استعملت النار أداةً هندسية أيضاً: فالإنسان الحديث بدأ في معالجة الحجر بالحرارة لتحسين قابليتها للتكسر إلى رقائق منذ 164.000 عام (براون وآخرون 2009). وقد أشار ميلرز Mellars م(2006) إلى توافر أدلة على ممارسة حرق النباتات تحت السيطرة في جنوب أفريقيا قبل 55.000 عام. إن حرص الباحثين عن الأعشاب على حرق النباتات كوسيلة للتعاطي مع البيئة في عصر الهولوسين كان بهدف المساعدة على الصيد (من خلال تسريع نمو العلف من جديد لجذب الحيوانات وتحسين مدى الرؤية) ولتسهيل قدرة الإنسان على الحركة، أو تحسين جمع الأغذية النباتية أو مزامنتها (مايسون Mason م2000).

إن شدة التنوع المكاني والزماني في السجل الآثاري تحول من دون التوصل إلى تعميم بسيط بشأن توازنات الطاقة في مجتمعات ما قبل التاريخ. فأوصاف التواصل الأولي مع من بقي من الصيادين وجامعي الطعام ودراساتهم الأنثروبولوجية تتمخض عن نتائج غير مؤكدة: فالمعلومات حول الجماعات التي تمكنت من البقاء في ظروف قاسية لمدة طويلة تكفي لدراستها دراسة علمية حديثة لا تعطينا سوى فكرة محدودة عن الحياة الرعوية في العصور القديمة في الظروف المناخية المعتدلة وفي المناطق الخصبة. زد على ذلك أن كثيراً من مجتمعات الصيد والجمع التي خضعت

المربع 2-1

استهلاك الخشب في طبخ اللحم فوق موقد مكشوف

إن الافتراضات الواقعية لمعرفة الحدود القصوى المعقولة لاستهلاك الخشب في طهو اللحم فوق موقد مكشوف في العصر الحجري المتأخر هي كما يلي (سميل 2013 أ): متوسط استهلاك الفرد من طاقة الطعام 10ميغاجول / فرد (ملائم للكبار، أعلى من المعدل لمجموع السكان) حيث يشكل اللحم 80% (8 ميغاجول) من مجموع استهلاك الطعام؛ كثافة الطاقة المتوافرة في الطعام من الذبائح 8 - 10ميغاجول / كغ (في الماموث بصفة خاصة و5 - 6 ميغا جول / كغ للحافريات الأضخم)؛ متوسط درجة حرارة المحيط 20 درجة مئوية في المناخ الحار و10 درجات مئوية في المناخ البارد؛ اللحم المطبوخ في الدرجة 80 مئوية (تكفي الدرجة 77 مئوية لطبخ اللحم جيداً)؛ السعة الحرارية للحم نحو 3 كيلو جول /كغ درجة مئوية؛ مردود الطبخ للموقد المكشوف 5% فقط؛ ومتوسط كثافة الطاقة للخشب المجفف بالهواء 15 ميغا جول/كغ. تتضمن هذه الافتراضات استهلاكاً يومياً للفرد بمعدل 1 كغ تقريباً من لحم الماموث (بالإضافة إلى 1 كغ من لحم حيوان من الحافريات) وحاجة يومية تقدر بنحو 4 - 6 ميغا جول من الخشب. وهكذا يكون المعدل السنوي 1.5 - 2.2 جيغا جول أو 100 - 150 كغ من الخشب (بعضه أخضر وبعضه مجفف بالهواء) فبالنسبة إلى 200.000 شخص ممن عاشوا قبل 20.000 عام تكون الحاجة الإجمالية 20.000 - 30.000 طن، وهذه حصة ضئيلة جداً (تقدر بنحو 10^{-8}) من الوقود النباتي الخشبي المتوافر في العصر ما قبل الزراعي.

للدراسة كانت قد تأثرت بفترات تواصل طويلة مع الرعاة والمزارعين أو المهاجرين من المناطق البعيدة (هدلاند Headland وريد Reid م1989؛ فيتزهف Fitzhugh وهابو Habu م2002). لكن غياب أنموذج ثابت للصيد والجمع لا يحول من دون التعرف على عدد من الضرورات البيو فيزيائية التي تحكم تدفق الطاقة وتحدد سلوك جماعات الصيد وجمع الثمار.

مجتمعات الصيد والجمع

تبين أكثر مجموعات الأدلة الموثوقة والشاملة أن متوسط الكثافة السكانية عند جماعات الصيد والجمع الحديثة كان يصنف في ثلاث درجات تعكس مجموعة من العادات الطبيعية ومهارات الحصول على الطعام وتقنياته (ميردوك Murdock م1967؛ كيلي Kelly م1983؛ لي وdaily Daily م1999؛ مارلو Marloweم 2005). كانت الحدود الدنيا تضم أقل من شخص واحد/ 100 كم^2 وتتزايد هذه النسبة حتى تصل إلى بضع مئات من الأشخاص / 100كم ^{2} مع متوسط شامل قدره 25 شخصاً / 100 كم ^{2} في 340 ثقافة خضعت للدراسة، وهذه أرقام ضئيلة لا تدعم مجتمعات أشد تعقيداً ذات تخصصات وظيفية متزايدة وطبقية اجتماعية. كان متوسط الكثافات عند الصيادين وجامعي الطعام أقل من الكثافات عند الثدييات آكلة النباتات الضخمة المشابهة التي كانت قادرة على هضم كتل سليلوزية كبيرة من الغطاء النباتي.

وبينما تقدر المعادلات الألومترية كثافة الثدييات من فئة 50 كغ بخمسة ثدييات/كم^2، تتراوح كثافات الشيمبانزي بين 1.3 و2.4 حيوان/كم^2، في حين كانت كثافات الصيادين - جامعي الثمار الذين عاشوا حتى القرن العشرين أقل من شخص واحد/كم^2 في المناطق الحارة، و0.24 في العالم القديم، و0.4 في العالم الجديد (مارلو 2005؛ سميل

2013 أ). أما الكثافة السكانية فكانت أعلى بكثير عند الجماعات التي تجمع بين جمع النباتات الوفيرة وبين الصيد (تشمل الأمثلة التي خضعت لدراسات مستفيضة جماعات في أوروبا في العصر ما بعد الجليدي وفي حوض المكسيك في الآونة الأخيرة) والمجتمعات الساحلية التي تعتمد على الأنواع المائية (مع مواقع آثارية موثقة جيداً في منطقة البلطيق ودراسات أنثروبولجية حديثة في شمال غرب المحيط الهادي).

لقد دعم جمع الحيوانات الرخوية، وصيد الأسماك والثدييات البحرية قرب الشاطئ أعلى كثافات لمجتمعات الجمع والصيد، وأدى إلى إنشاء مستوطنات شبه دائمة أو حتى دائمة. كما شكلت القرى الساحلية في الشمال الغربي من المحيط الهادي بمنازلها الكبيرة وعمليات الصيد الجماعي المنظمة حالات فريدة من حياة الحضر. ولم تكن هذه الاختلافات الكبيرة في الكثافة وظيفة بسيطة من وظائف تحولات الطاقة في محيطها الحيوي، إذ لم تكن تتراجع بانتظام نحو المناطق القطبية وتتقدم نحو المناطق الاستوائية (بالتناسب مع زيادة مردود عملية التركيب الضوئي) أو تقابل إجمالي كتلة الحيوانات المتوافرة للصيد، بل كانت تتحدد وفق المتغيرات البيئية بالاعتماد النسبي على الغذاء النباتي أو الحيواني واستخدام التخزين الموسمي. كانت كل الكائنات الباحثة عن الطعام، مثلها مثل الرئيسات، كائنات عاشبة ولاحمة في الوقت ذاته. لكن اصطياد الحيوانات الكبيرة كان تحدياً كبيراً للطاقة لأنه كان يستهدف مخزون طعام أصغر بكثير من جمع النباتات، وهذا نتيجة طبيعية لتراجع انتقال الطاقة بين المستويات الغذائية.

لا تستهلك الكائنات العاشبة سوى 1 - 2% من صافي المنتجات الأولية في الغابات المعتدلة النفضية، و50 - 60% في بعض الأراضي الاستوائية العشبية حيث تمثل 5 - 10% في معظمها الرعي الأرضي (سميل 2013 أ). وبصفة عامة فإن ما يتم هضمه من كمية الكتلة النباتية أقل من 30%، ومعظمها يطرح بالتنفس، أما في الطيور والثدييات فإن ما يتحول إلى كتلة حيوانية لا يتجاوز 1 - 2%. ونتيجة لذلك، فإن أكثر آكلات العشب التي يجري اصطيادها تتضمن أقل من 1% من الطاقة المختزنة أصلاً في الكتلة النباتية في نظم البيئة التي كانت تسكنها. هذه الحقيقة تفسر لنا سبب تفضيل الصيادين اصطياد حيوانات تجمع بين أجساد بالغة ضخمة مع إنتاجية عالية وكثافة أرضية مثل الخنازير البرية (90 كغ) والغزلان والأيائل (معظمها 25 - 500 كغ) التي كانت أهدافاً شائعة.

وحيث كانت مثل هذه الحيوانات منتشرة نسبياً كما في المناطق العشبية الاستوائية أو المعتدلة، أو في الأحراش الاستوائية، فقد كان الصيد وفيراً، لكن على النقيض من الفكرة الشائعة عن وفرة الحيوانات بشتى أنواعها في الغابات الاستوائية فإن نظمها البيئية كانت ضعيفة فيما يخص الصيد. فغالبية الحيوانات في الغابات الاستوائية صغيرة الحجم تعيش في الأشجار وتتغذى بأوراقها وثمارها (مثل القرود والطيور) وهي نشطة، ولا يمكن الوصول إليها في أعالي الأشجار (وكثير منها حيوانات ليلية) لذلك كان مردود اصطيادها من الطاقة ضعيفاً. وجد سيليتو Sillitoe م(2002) أن كلفة جمع الثمار والصيد كليهما في الغابة المطيرة في مرتفعات بابوا غينيا الجديدة عالية، حيث ينفق جامعو الطعام في الصيد أربعة أضعاف الطاقة التي يحصلون عليها من الطعام. ومن الواضح أن هذا المردود الضعيف لن يسمح للصيد بأن يكون المصدر الأول للطعام (فلا يمكن تفسير مردود الطاقة السلبي إلا بتأمين البروتين الحيواني) وكان من الضروري العثور على بعض أشكال الزراعة المتحركة لتوفير كمية كافية من الطعام.

لقد خلص بايلي Bailey وفريقه (1989) إلى نتيجة مفادها أنه لا توجد حالات إثنية قاطعة بشأن جماعات جمع وصيد عاشت في الغابات الاستوائية المطيرة من دون شيء من الاعتماد على بعض النباتات والحيوانات المدجنة. وقد عدل بايلي وهدلاند Headland م(1991) تلك النتيجة بعد ظهور دليل آثاري من ماليزيا يشير إلى أن الكثافة العالية لنخيل الساغو والخنازير تسمح ببعض الاستثناءات. وبالمثل، كانت عملية جمع الثمار ضعيفة المردود إلى حد كبير في المناطق الاستوائية الغنية بأنواع الحيوانات وفي غابات المناطق المعتدلة. فهذه النظم البيئية تختزن السواد الأعظم من الوقود النباتي في الكوكب، لكنها تفعل هذه في الغالب في الأنسجة الميتة من جذوع الأشجار الباسقة التي لا يستطيع الإنسان هضم ما فيها من سليلوز وفحم (سميل 2013 أ). فالفاكهة والبذور الغنية بالطاقة ليست سوى جزء يسير من إجمالي الكتلة النباتية وغالباً ما يتعذر الوصول إليها لأنها بعيدة في أعالي الأشجار. أما البذور فهي محمية بوساطة أغطية صلبة وتحتاج إلى معالجة تستهلك طاقة كبيرة قبل استهلاكها. أما جمع الطعام في الغابات الاستوائية فيحتاج إلى مزيد من البحث: فكثرة الأنواع تعني احتمال وجود مسافات شاسعة بين الأشجار أو

العروق التي تحتوي على أجزاء جاهزة للقطاف (الشكل 2-2)، وحصاد المكسرات في البرازيل أصدق مثال على هذه القيود (المربع 2-2).



الشكل 2-2

الغابات الاستوائية المطيرة غنية بأنواع الحيوانات لكنها فقيرة نسبياً في النباتات التي تدعم جماعات سكانية كبيرة من الصيادين وجامعي الطعام. وتبين هذه الصورة الغطاء الشجري في لا فورتونا La Fortuna في كوستا ريكا (Corbis).

إن المناطق العشبية وغاباتها، على النقيض من الغابات الاستوائية وغابات المناطق الباردة، توافر فرصاً ممتازة لجمع الثمار والصيد؛ فما تختزنه من الطاقة أقل من الغابات الكثيفة، لكن جزءاً كبيراً منها يتخذ شكل بذور وثمار يسهل جمعها وهي غنية بالقيمة الغذائية أو مساحات مركزة من الجذور والدرنات النشوية الضخمة. لقد جعلت كثافة الطاقة العالية (تصل إلى 25 ميغا جول/كغ) المكسرات مفضلة، وبعضها مثل البلوط والكستناء، سهلة القطاف. وعلى عكس ما نراه في الغابات فإن بإمكان كثير من الحيوانات التي ترعى في المناطق العشبية أن تكتسب أحجاماً هائلة، وغالباً ما تنتقل بقطعان ضخمة، وتعطي مردوداً ممتازاً من الطاقة المستثمرة في الصيد.

من ناحية أخرى، كان باستطاعة جماعات أشباه البشر الحصول على اللحوم في المناطق العشبية والغابات حتى من دون أي أسلحة، بصفتهم جامعي طعام،

المربع 2-2

حصاد الجوز البرازيلي

يحتوي الجوز البرازيلي بسبب نسبة الدهون العالية فيه على نحو 27 ميغا جول/كغ من البروتين (مقارنة بنحو 15 ميغاجول/كغ في الحبوب) ونحو 14% من البروتين، كما أنه مصدر من مصادر البوتاسيوم والمغنيزيوم والكالسيوم والفوسفور ومستويات عالية من السيلينيوم (القيمة الغذائية 2015). لكن جمع الجوز عملية شاقة وخطيرة. فشجرة الجوز المعروفة باسم بيرتوليتيا إكسلسا Bertholletia excelsa يصل ارتفاعها إلى 50 متراً مع وجود مساحات فارغة بين الأشجار. وتحتوي الثمرة على 8 - 24 حبة من الجوز مخبأة داخل كبسولات ثقيلة (يصل وزنها إلى 2 كغ) مغطاة بقشرة داخلية تشبه قشرة جوز الهند. وعلى جامعي الطعام أن يحددوا زمن الحصاد بدقة: فإذا كان الوقت مبكراً تعذر الوصول إلى القرون في أعالي الأشجار، ووجب على الحصادين القيام برحلة أخرى. أما إذا تأخر الحصاد عن موعده فإن قوارض الأغوطي، وهي من القوارض الكبيرة وهي الوحيدة القادرة على فتح الثمار المتساقطة، ستأكل البذور على الفور أو تدفنها في مخابئ الطعام لديها (هوغاسن Haugaasen وآخرون 2010).

سريعي الجري، واسعي الحيلة. وفي ضوء الميزات البدنية المحدودة لدى أوائل البشر وفي غياب الأسلحة الفعالة، كان من المحتمل جداً أن يكون أسلافنا بارعين في جمع الثمار أكثر منهم في الصيد (بلومنشاين Blumenschine وكافالو Cavallo م1992: بوبينر Pobiner م(2015). وكثيراً ما خلفت الحيوانات المفترسة، مثل الأسود والفهود والقطط مسيفة الأنياب، بقايا جثث حيوانات عاشبة. ويمكن للبشر الوصول إلى هذا اللحم، أو على الأقل نخاع العظم المغذي، قبل أن تصل إليه الجوارح والضباع والحيوانات الأخرى التي تقتات على الجيف. لكن دومينغيز- رودريغو (2002) ذكر أن أكل بقايا لحم الحيوانات لا يوفر ما يكفي من اللحم، وأن الصيد وحده هو القادر على توفير ما يكفي من البروتين الحيواني في المناطق العشبية. على أي حال، إن السير على قدمين والقدرة على التعرق أكثر من بقية الثدييات جعل بالإمكان مطاردة حتى أسرع الحيوانات العاشبة لدرجة الإعياء (المربع 2-3).

يعتقد كاريير Carrier م(1984) أن المعدلات العالية لتبديد الحرارة عند الإنسان منحته ميزة بارزة في التطور وقدمت خدمة جليلة لأجدادنا في امتلاك خاصية جديدة تتمتع بها الضواري النهارية من ذوات الدم الحار. فالجماعات البشرية احتفظت بميزة التعرق الغزير وبالتالي بقدرتها على أداء الأعمال الشاقة في الجو الحار حين هاجرت إلى مناطق أبرد: وليس ثمة فوارق رئيسة في كثافة الغدد المفرزة للعرق بين الجماعات السكانية في المناطق مختلفة المناخ (تايلور Taylor م2006) إذ إن بإمكان سكان خطوط العرض المتوسطة والعالية تحقيق معدلات التعرق ذاتها التي يتميز بها سكان المناطق الحارة بعد فترة بسيطة من التأقلم.

لكن ما إن تم اختراع الأدوات الملائمة وتبنيها حتى صارت المفضلة لدى الصيادين أكثر من مطاردة الفريسة والإمساك بها. وأكد فايث Faith م(2007) بعد فحص 51 مجموعة من العصر الحجري الوسيط و98 من العصر الحجري المتأخر أن أوائل الصيادين الأفارقة كانوا قادرين تماماً على صيد الحافريات بما فيها الجاموس. لقد قدمت متطلبات الطاقة الضرورية الخاصة بصيد الحيوانات الضخمة إسهامات لا حصر لها في تكوين المجتمعات الإنسانية. وخلص ترينكاوس Trinkaus م(1987، 131 - 132) إلى أن «معظم الخصائص المميزة عند الإنسان، مثل السير على قدمين، والمهارة اليدوية، والتقنية المتطورة، والتدمُّغ المميز يمكن أن تعد نتاجاً لمتطلبات نظام انتهازي للصيد وجمع الطعام».

ولا يعرف على وجه الدقة دور الصيد في نشوء المجتمعات الإنسانية. فالنجاح في صيد حيوانات ضخمة بأسلحة بدائية ضئيل إلى درجة لا يمكن قبولها، كما كان على جماعات الصيادين المعقولة الحفاظ على الحد الأدنى من

التعاون لتتبع الحيوانات الجريحة، وذبحها ونقل لحومها ومن ثم اقتسامها. لقد جلب الصيد التعاوني أكبر المكافآت التي لا تقارن بغيرها وذلك بسَوق الحيوانات بطرائق تعد إعداداً

المربع 2-3

الجري وتبديد الحرارة عند الإنسان

لذوات الأربع قاطبة سرعات مثالية لمختلف صنوف حركات السير مثل المشي، والخبب، والرهو عند الحصان. لكن الجري عند الإنسان يستهلك طاقة عالية نسبياً بالمقارنة مع الجري عند حيوانات أخرى بالحجم ذاته. لكن بوسع الإنسان، على عكس الحيوانات، إلغاء كلفة سرعة الجري تلك لسرعات عامة بين 2 و6 م/ثا (كاريير؛ برامبل Bramble وليبرمان Lieberman م2004). ويمكن تفسير هذا الإنجاز بتأثير المشي على قدمين والكفاءة في تبديد الحرارة. فعملية التهوية عند ذوات الأربع محدودة بنفس واحد لكل دورة حركية. ويتوجب على عظام الصدر وعضلاته امتصاص الصدمات التي تتعرض لها الأطراف الأمامية حيث يقوم الرباط الظهري - البطني بضغط الصدر وبسطه، لكن تنفس الإنسان يمكن أن يختلف بحسب تواتر الخطوة: فباستطاعة الإنسان الجري بسرعات متفاوتة، أما سرعة ذوات الأربع المثالية فمحددة ببنية أجسامها.

إن قدرة الإنسان على تنظيم درجة حرارة جسمه تعتمد على معدلات التعرق العالية. فالحصان يفقد الماء بمعدل 100 غ/م^2، من جلده، والجمل يفقد 250 غ/م^2، أما الإنسان فيفقد أكثر من 500 غ/م^2، بمعدلات قصوى تتجاوز 2 كغ/سا (توري Torii م1995؛ تايلور وماتشادو - موريرا Machado-Moreira م2013). ويتحول معدل التعرق إلى فقدان 550-625 واط من الحرارة، وهذا كاف لتنظيم درجة الحرارة حتى في أثناء العمل الشاق. كما يمكن للإنسان أن يشرب أقل ما يتعرق، ويعوض فقدان الماء من جسمه بعد ذلك بساعات. لقد حول الجري بني البشر إلى ضوار نهارية عالية الحرارة قادرة على مطاردة الحيوانات حتى تصاب بالإعياء (هاينريتش Heinrich م2001؛ ليبنبيرغ Liebenberg م2006). وتتضمن عمليات المطاردة الموثقة تلك التي استطاع فيها هنود تاراهومارا Tarahumara من شمال المكسيك الإمساك بالغزلان، وهنود النافاهو Navajo الإمساك بالوعول الأمريكية شوكية القرون. وكان باستطاعة البازاراوا Basarwa في كالاهاري مطاردة قطعان الديكر (ظباء أفريقية صغيرة) والجمزبوكة (مهاة كبيرة في أفريقية الجنوبية) بل والحُمُر الوحشية في فصول الجفاف لدرجة الإعياء وبالمثل استطاعت جماعات من سكان أستراليا الأصليين الإمساك بحيوانات الكنغر. واستطاع الصيادون وهم يركضون حفاة الأقدام تقليص مصروفهم من الطاقة بنسبة 4% (وكانت إصاباتهم الحادة والمزمنة بكاحل القدم وأسفل الساق) أقل من العدائين المعاصرين بأحذيتهم الرياضية (وربيرتون Warburton م2001).

جيداً وتنفذ بدقة وإحكام ودفعها نحو مسارات محددة (مستخدمين الأحراش، والأحجار، والسياجات الخشبية أو المطبات) ومن ثم حصرها في حظائر أو مصائد معدة خصيصاً لهذا الغرض، أو - وربما كان هذا أكثر الحلول عبقرية - دفعها مذعورة لتسقط من فوق الجروف الصخرية (فريزون Frison م1987). وما أكثر الحيوانات العاشبة - مثل الماموث، والبيسون، والغزال، والوعل، وماعز الجبل - التي كانت تذبح بهذه الطرائق، وتوافر مخزونات من اللحم المجمد أو المعالج (اللحوم المدخنة أو المقددة).

من أكثر المواقع التي يرتادها زوار الإنترنت موقع دفع الجواميس للقفز إلى حتفها بالقرب من فورت ماكلاود في إقليم ألبرتا. ويبين موقع اليونسكو للتراث العالمي استراتيجية صيد الجواميس التي كانت سائدة قبل 5.700 عام. «للبدء في عملية الصيد، يقوم الصبية بحث القطيع على اللحاق بهم بأن يقلدوا ثغاء عجل ضائع. ومع اقتراب القطيع من مسارات الطريق المرسوم (وهي خطوط من أكوام الحجر بنيت لمساعدة الصيادين على دفع الجواميس نحو موقع الجرف القاتل) يقوم الصيادون بتطويقها من الخلف بعكس اتجاه الريح وإثارة فزعها بالصراخ والتلويح

بالأثواب» فتندفع الحيوانات من فوق الجرف الصخري لتلقى حتفها (اليونسكو 2015 أ). بحلول حقبة البليستوسين المتأخرة كان الصيادون قد اكتسبوا مهارة جعلت كثيراً من طلاب الحقبة الرابعة يستنتجون أن الصيد مسؤول إلى حد بعيد عن اختفاء الحيوانات الضخمة في حقبة البليستوسين المتأخرة (اختفاءً تاماً) وهي الحيوانات التي تزن أكثر من 50 كغ (مارتن Martin م1958، 2005؛ فيدل Fiedel وهينيز Haynes م2004)، لكن الحكم يبقى غير مؤكد (المربع 2-4).

كانت سائر المجتمعات ما قبل الزراعية عاشبة ولاحمة في الوقت ذاته. ولم يكن بمقدورها التعفف عن أي مصدر من مصادر القوت المتوافرة. صحيح أن الباحثين عن الطعام كانوا يأكلون أنواعاً كثيرة من النباتات والحيوانات غير أن بضعة أنواع

المربع 2-4

انقراض الحيوانات الضخمة في حقبة البليستوسين المتأخرة

إن استمرار قتل الحيوانات بطيئة التكاثر (تلك التي تضع مولوداً واحداً بعد فترة حمل طويلة) قد يؤدي إلى انقراضها. ولو افترضنا أن الاحتياجات اليومية الكبيرة للباحثين عن الكلأ في حقبة البليستوسين المتأخرة تبلغ 10 آلاف جول / للفرد، وأنهم كانوا يأكلون اللحوم على الأغلب، وأن معظم كمية اللحوم (80%) كان مصدرها الحيوانات الضخمة، فإن عددهم، ويقدر بمليوني نسمة، يحتاج إلى 2 ميغاطن من اللحم الطازج (سميل 2013 أ). ولو افترضنا أن الماموث هو النوع الوحيد الذي يصيده هؤلاء، فإن هذا يعني قتل 250.000 - 400.000 حيوان. لقد استهدف اصطياد العاشبات الضخمة ثدييات كبيرة أخرى (مثل الفيلة، والغزلان العملاقة، والبيسون، والأوركة) وهذا يعني أن الحصول على 2 ميغاطن من اللحم من أنواع مختلطة يتطلب قتل مليوني حيوان سنوياً. وثمة تفسير أكثر احتمالاً لحالات الانقراض في حقبة البليستوسين المتأخرة هي مجموعة من العوامل الطبيعية (تغير المناخ والنباتات) والأنثروبوجينية (الصيد والنار) (سميل 2013 أ).

رئيسة فقط كانت تسود أنظمتهم الغذائية. كان تفضيل البذور حتمياً عند جامعي الثمار. فبصرف النظر عن سهولة جمعها وتخزينها، كانت البذور غنية بالطاقة وتحتوي على كمية عالية نسبياً من البروتين. فطاقة الطعام في بذور الأعشاب البرية لا تقل عنها في الحبوب المزروعة (يحتوي القمح على 15ميغاجول/كغ) في حين تتجاوز كثافة الطاقة في المكسرات 80% (يحتوي الجوز -عين الجمل- على 27.4 ميغا جول/كغ).

تعد اللحوم البرية بأكلها مصدراً ممتازاً للبروتين، لكن معظمها يحتوي على القليل من الدهون، لذا فإن لها كثافة طاقة متدنية جداً - أقل من نصف ما تحتويه الحبوب للثدييات الهزيلة الصغيرة. فليس غريباً إذن أن نرى أن الأنواع الضخمة والسمينة نسبياً هي المفضلة على نطاق واسع لدى الصيادين. فالماموث الصغير يوفر من طاقة الطعام ما يعادل تلك التي يوفرها 50 أيلاً، في حين أن ثور بيسون واحداً يعادل بسهولة 20 غزالاً (المربع 2-5). لذا نرى أن أسلافنا في العصر الحجري الحديث Neolithic كانوا مستعدين للإيقاع بفيلة الماموث الضخمة بأسلحتهم البسيطة برؤوسها الحجرية، والهنود الحمر في سهول أمريكا الشمالية، في معرض

المربع 2-5

كتل الأجسام وكثافات الطاقة ومحتوى الطعام من الطاقة في حيوانات الصيد

الحيوانات	كتلة الجسم (كغ)	كثافة الطاقة (ألف جول/كغ)	طاقة الطعام لكل حيوان (ألف جول)
الحيتان	40.000 - 5000	30 - 25	800.000 - 80.000
الخرطوميات (الفيل، الماموث)	4.000 - 500	12 - 10	24.000 - 2.500
البقريات الضخمة (الأوركة، البيسون)	400 - 200	12 - 10	2.400 - 1.000
الأيائل الكبيرة (الإلكة، الأيل)	200 - 100	6 - 5	600 - 250
الفقمة	150 - 50	18 - 15	1.800 - 500
البقريات الصغيرة (الظبي، الغزال)	60 - 10	6 - 5	180 - 25
القرود الكبيرة	10 - 3	6 - 5	30 - 5
الأرنبيات (الأرنب البري، الأرنب)	5 - 1	7 - 5	17 - 3

هوامش: أفترض أن البروتين المصلحة للأكل يشكل ثلثي كتلة الجسم عند الحيتان والفقمة ونصف كتلة الجسم عند الحيوانات الأخرى. وحسبت متوسط كثافة الطاقة عند الحيتان بافتراض أن 25% من كتلة أجسامها من الدهون.

المصادر: بالاعتماد على معلومات أوردها ساندرز Sanders، بارسونز Parsons وسانتلي Santley م(1979)، شيهان Sheehan م(1985) وميديروس Medeiros وفريقه (2001).

بحثهم عن الطعام الدهني لتحضير البميكان[13] الذي يدوم طويلاً، صرفوا كميات كبيرة من الطاقة وهم يطاردون ثيران البيسون.

لكن اعتبارات الطاقة وحدها لا تفسر سلوك الصيد والجمع. فلو كانت سائدة على الدوام، لكان الصيد والجمع المثالي استراتيجتهم الكلية - أي محاولة الصيادين وجامعي الثمار زيادة صافي طاقتهم بتقليص الزمن والجهد المبذول في البحث عن النباتات إلى أدنى حد - (بتينغر Bettinger م1991). ويفسر الصيد والجمع المثالي تفضيل اصطياد الثدييات الضخمة والسمينة أو جمع أجزاء نباتية أضعف بقيمتها الغذائية ولا تحتاج إلى معالجة بدلاً من المكسرات كثيفة الطاقة التي يصعب كسرها. ولا ريب في أن كثيراً من الصيادين وجامعي الثمار تصرفوا بطرائق ترفع مردود طاقاتهم إلى الذروة، لكن ضرورات الوجود الأخرى غالباً ما كانت تعاكسهم. ومن بين تلك الضرورات توافر المأوى الليلي الآمن، والحاجة إلى حماية المناطق من الجماعات المنافسة، وإلى مصادر مياه يعتمد عليها، وإلى الفيتامينات والمعادن. كذلك كان للمواقف من العمل والأمور المفضلة أهميتها أيضاً (المربع 2-6).

أثار عجزنا عن إعادة بناء توازنات الطاقة كما كانت قبل التاريخ تعميمات لا يمكن قبولها. فإجمالي الصيد وجمع الثمار عند بعض الجماعات كان منخفضاً نسبياً؛ لا يتجاوز بضع ساعات يومياً. ولقد أدى هذا الاكتشاف إلى وصف مجتمع الصيد والجمع بأنه «مجتمع الرفاهية الأصلي»؛ مجتمع يعيش أفراده بحبوحة مادية وتسوده الراحة والنوم (ساهلينز Sahlins م1972). وأبرز مثال هم الدوب Dobe! فقد كان من المعتقد أن جماعات الكونغ Kung من صحراء كالاهاري في بوتسوانا والتي تعيش على النباتات البرية واللحم، تعطينا نافذة ممتازة تطل على حياة مجتمعات الصيد والجمع في فترة ما قبل التاريخ، حيث يعيش أفرادها حياة سعيدة، صحية، مفعمة بالنشاط (لي ودي فور De Vore م1968). لكن هذه النتيجة المبنية على دليل

المربع 2-6

الأطعمة المفضلة والمواقف تجاه العمل

تفسر الأطعمة المفضلة تفسيراً جيداً من خلال مقارنة مجموعتين متماثلتين من الصيادين وجامعي الثمار في جميع النواحي الأخرى. ترجع شهرة مجتمع كونغ! (في بوتسوانا) في مؤلفات الانثروبولوجيا إلى اعتمادهم على جوز المونغونغو المغذي والمتوافر بكثرة وهو ما منحهم عائدات طاقة موثقة في جمع الطعام. لكن الأيز Aise وهم جماعة أخرى من البساروا باستطاعتها جمع الجوز هذا لم تأكله لأنها ترى أنه رديء الطعم (هيتشكوك Hitchcock وإيبرت Ebert م1984). وبالمثل، نرى أن جماعات تعيش على سواحل أستراليا الجنوبية حصلت على نسب عالية من كثافة الطاقة من صيد الأسماك، لكن ثمة أدلة عبر مضيق الأرخبيل تبين غياب بقايا الأسماك ذات الحراشف من الروابي التي سكنوها في تاسمانيا Tasmania (تايلور 2007).

وتعد المقارنة التي أجراها ليزوت Lizot م(1977) بين مجموعتين متقاربتين من هنود يانومامي Yanomami (شمال أمازونيا) مثالاً ممتازاً عن اختلاف الوقائع الثقافية عن نماذج الطاقة المغرقة في التبسيط. فالجماعة المحاطة بالغابة تستهلك أقل من نصف ما تستهلكه المجموعة المجاورة من كمية طاقة الطعام الحيوانية والبروتين في منطقة ليس فيها كثير من الخنازير البرية، والتابير، والقرود بالرغم من امتلاكها مهارات الصيد وأدواته ذاتها. أما تفسير ليزوت فهو كما يلي: كان أفراد الجماعة الأولى كسالى، ولم يمارسوا الصيد إلا لماماً، وباختصار، كانوا يفضلون ألا يأكلوا جيداً . «في أحد الأسابيع... لم يخرج الرجال للصيد، فقد كانوا قد جمعوا نبات الهلوسة المفضل لديهم (أنادينانثيرا بيريغرينا Anadenanthera peregrina) وأمضوا أيامهم يتعاطون المخدرات. ولما اشتكت النسوة من قلة اللحم، لم يلقين من الرجال أذناً صاغية». (ليزوت 1977، 512).

هذه إحدى الحالات الشائعة التي تمثل اختلافاً كبيراً بين الطاقة التي يوفرها الصيد لا علاقة لها لا بتوافر الموارد (وجود الحيوانات) ولا بكلفة الطاقة التي يتطلبها الصيد (مع التسليم بوجود أسلحة بسيطة متماثلة) لكنها تتعلق بالموقف من العمل. ومن الأمثلة الأخرى عن الأعمال غير المتوافقة والتفسيرات المعتمدة على الطاقة مثال مستمد من تحليل المعطيات بشأن تقاسم اللحم بين أفراد الهازدا Hazda في تانزانيا (هوكس Hawkes، أوكنل O'Connell وجونز Jones م2001). يعتمد أفضل تفسير لتقاسم لحم الحيوانات الضخمة على نطاق واسع

على الحد من مخاطر صيد هذه الحيوانات - لكن التقاسم عند الهازدا لم يكن مدفوعاً بتقليص المخاطر المتبادل، لكنه كان يتم بالدرجة الأولى بدافع دعم مكانة الصياد بوصفه جاراً محبباً.

محدود جداً وتحيط به الشكوك، لابد لها من مواجهة التحدي، وقد تعرضت للتحدي بالفعل (بيرد - ديفيد Bird-David م1992؛ كابلان Kaplan م2000؛ بوجين Bogin م2011).

لقد أهمل التنظير المبسط حول رفاهية مجتمعات الصيد والجمع واقع هذا العمل الشاق ومدى خطورته واستمرار الضغوط البيئية والأمراض المعدية التي اجتاحت مجتمعاتهم حيث دفع النقص في الطعام أفراد هذه المجتمعات إلى أكل أنسجة نباتية غير مستساغة أصابتهم بالهزال وغالباً بالمجاعة. كما تسببت أيضاً في ارتفاع معدل وفيات الأطفال (بما فيها قتل الرضع) وساعدت على تدني معدلات الخصوبة. وليس من الغريب أن تبين إعادة تحليل مصروف الطاقة والمعلومات السكانية التي جمعت في الستينيات من القرن الماضي أن الحالة الغذائية والصحية في مجتمع دوبي! كونغ كانت «خطيرة على أحسن تقدير، وتدل على أن المجتمع يواجه خطر الانقراض على أسوأ تقدير» (بوجين 2011، 349). وعلى حد تعبير فرومنت Froment م(2001، 259) فإن «التعامل مع الأخطار وأعباء الأمراض، بيّن أن الصيادين - جامعي الثمار لا يعيشون - ولم يعيشوا على الإطلاق - في جنة عدن؛ وأن حياتهم لم تكن حياة دعة ورغد، بل كانوا في عوز وفاقة واحتياجاتهم وطموحاتهم محدودة».

تشير الحسابات التقريبية لعدد صغير من جماعات الصيد والجمع في القرن العشرين عائدات طاقة صافية لجمع بعض الجذور. وتقدر وحدات الطاقة الغذائية التي جمعت بنحو 30 - 40 وحدة مقابل كل وحدة صرفت. وبالعكس، فإن كثيراً من عمليات الصيد، فوق كل تلك التي جرت بحثاً عن ثدييات صغيرة الحجم على الأشجار أو الأرض في الغابات المطيرة الاستوائية، حققت خسارة في الطاقة أو قيمة تعادلها (المربع 2-7). أما عائدات الطاقة الأنموذجية فكانت 10 - 20 ضعفاً، وهذا يماثل تلك التي تتحقق من صيد الحيوانات الضخمة. كما كانت العائدات في الحقبة ما قبل التاريخية من دون شك أعلى بكثير في كثير من المناطق الغنية بالوقود الحيوي، ما سمح بزيادة مطردة في التعقيد الاجتماعي.

المربع 2-7

صافي عائدات الطاقة في الصيد والجمع

سأستعمل الطريقة الموصوفة في المربع 1-10 وأفترض أن أفراد مجتمعات الصيد والجمع في حقبة ما قبل التاريخ كانوا قصار القامة (حيث لا يزيد متوسط وزن الشخص البالغ على 50 كغ). يتطلب هذا نحو 6 ميغا جول/كغ (نحو 250 كيلو جول/سا) للاستقلاب الأساسي، وحاجة الكبار إلى طاقة غذائية تبلغ نحو 8 ميغا جول أو نحو 330 كيلو جول/سا. كان جمع النباتات يتطلب على الأغلب جهداً بين الخفيف والمتوسط، في حين أن مهمات صيد الحيوانات وصيد السمك كان يتطلب جهداً يتراوح بين خفيف وثقيل. أما الصياد وجامع الثمار الأنموذجي فكان بحاجة إلى أربعة أضعاف معدل الاستقلاب الأساسي وكانت النساء بحاجة إلى خمسة أضعاف ذلك، أو 900 كيلو جول/سا تقريباً. فإذ طرحنا الحاجة الوجودية الأساسية حصلنا على صافي مدخل طاقة عند الصيادين وجامعي الثمار يقدر بنحو 600 كيلو جول/سا. أما مخرج الطاقة فهو قيمة الأجزاء المصلحة للأكل من النباتات المجمعة أو الحيوانات المقتولة.

في الواقع، فإن كثيراً من مجتمعات الصيد والجمع وصلت إلى مستويات من التعقيد لا ترتبط عادة إلا بالمجتمعات الزراعية التي ظهرت فيما بعد. فقد كانت لديهم مستوطنات دائمة، وكثافات سكانية عالية، ومخازن طعام واسعة، وطبقات اجتماعية، وطقوس دقيقة، وبدايات حصاد المحاصيل. كان لدى صيادي الماموث في العصر الحجري الأعلى في منطقة الرواسب الغضارية المورافية منازل جيدة من الحجر، كما صنعوا العديد من الأدوات الممتازة، واستطاعوا معالجة الفخار بالنار (كليما Klima م1954). أما الدافع وراء التعقيد الاجتماعي لدى الجماعات في العصر الحجري الأعلى في الجنوب الغربي من فرنسا فكان التأثير القوي من المحيط الأطلسي الذي نتج عنه فصول صيف باردة وفصول شتاء معتدلة بصورة استثنائية، أطالت فصل الزراعة وضاعفت إنتاجية السهول المفتوحة أو السهوب في أقصى جنوب القارة ما ساعد القطعان العاشبة أكثر من أي منطقة أخرى في أوروبا في العصر ما قبل الجليدي (ملارز Mellars م1985). وليس أدل على مدى تعقيد هذه الثقافات في العصر الحجري من التماثيل والمنحوتات الرائعة والرسوم التي تركها أهلها على جدران الكهوف (غرايسون Grayson ودلبيك Delpech م2002؛ فرنش French وكولينز Collins م2015) (الشكل 2-3).

ارتبطت أعلى درجات الإنتاجية في الصيد والجمع باستغلال الموارد المائية (يزنر Yesner أ1980) فقد أظهرت عمليات الاكتشاف الخاصة بالعصر الحجري الوسيط في جنوب اسكندنافيا أنه ما إن أتى صيادو ما بعد العصر الجليدي على مخزون من الحيوانات العاشبة الضخمة، حتى تحولوا إلى صيد الدلافين والحيتان والأسماك



الشكل 3-2

رسومات فحمية تمثل حيوانات على جدار كهف شوفيه Chauvet Cave جنوبي فرنسا. هذه الصور يعود تاريخها إلى ما بين 32.900 و30.000 عام (Corbis).

وجمع المحار (برايس Price م1991). لقد عاش هؤلاء في مستوطنات كانت في الغالب مستديمة وتتضمن مقابر. كما كانت لقبائل شمال غرب المحيط الهادي المعتمدة على صيد الأسماك مستوطنات تضم عدة مئات من السكان يعيشون في منازل خشبية جيدة البناء. فهجرات سمك السلمون المنتظمة كانت تضمن مصدراً سهلاً يمكن الاعتماد عليه ويمكن تخزينه بأمان (بالتدخين) لتوفير غذاء ممتاز. وبفضل محتوياته العالية من الدهون (نحو 15%) كان للسلمون كثافة طاقة (9.1 ميغا جول/كغ) تفوق كثافة سمك القد (3.2 ميغا جول/كغ) بثلاثة أضعاف. وتعد حالة شعب الأنويت في شمال غرب ألاسكا حالة مثالية لكثافة السكان المعتمدين على الصيد البحري، حيث بلغ صافي عائدات الطاقة المستمدة من صيد حيتان البالين أكثر من 2.000 ضعف (شيهان 1985) (المربع 2-8).

تطلبت المؤن المستمدة من تحولات الطاقة تخزيناً مكثفاً ودقيقاً على الأغلب. فعمليات التخزين شملت الصيد في طبقات الأرض العميقة المتجمدة، وتجفيف الأطعمة البحرية والثمار واللحوم وتدخينها، وتخزين البذور والجذور، والحفظ بالزيت، وصنع النقانق، وأنواع كعك الجوز، والدقيق وغيرها. لقد غير تخزين الطعام طويل الأجل واسع نطاق موقف مجتمعات الصيد والجمع من الزمن، والعمل والطبيعة كما ساعد في استقرار السكان بكثافات عالية (هايدن 1981؛ تستارت Testart أ1982؛ فيتسهيو Fitzhugh وهابو Habu أ2002). ولعل التخطيط الزمني وتوزيعه كان من أهم فوائد التطور. هذا الأسلوب في الحياة منع تكرار الترحال وأسس طريقة عيش مختلفة قائمة على تراكم الفائض. كانت العملية تضخم ذاتها: فالبحث عن التحكم بحصة لا تكف عن التوسع من تحولات الطاقة الشمسية وضعت المجتمعات على طريق زيادة التعقيد.

بالرغم من أن فهمنا لتطور أشباه البشر في الجيلين الماضيين حقق تقدماً كبيراً لدرجة تستحق الإعجاب، إلا أنه بقي أمامنا مجال واحد من عدم اليقين: فعلى النقيض من سائر الادعاءات الشائعة بشأن فوائد الأنظمة الغذائية في العصر الحجري، إلا

المربع 2-8

صيادو الحيتان في ألاسكا

في أقل من أربعة أشهر من صيد حيتان البالين قرب الشواطئ حيث تمر خطوط هجرتها على امتداد ساحل ألاسكا، كان الرجال في قوارب الأمياك umiak (زوارق ذات هياكل من الخشب الطافي على الماء أو من عظام الحيتان المغطى بجلود عجول البحر ويحمل كل منها ثمانية أشخاص على الأكثر) يكدسون الطعام للمستوطنات التي وصل تعداد سكانها قبل التواصل إلى 2.600 نسمة تقريباً (شيهان 1985؛ ماكارتني McCartney أ1995). ومع أن وزن أضخم حيتان البالين يبلغ 55 طناً، نرى أن متوسط وزن معظم الحيوانات اليافعة التي وصلت اليابسة في أغلب الأحيان كان 12 طناً تقريباً. فكثافة الطاقة العالية في دهن الحوت (نحو 36ميغاجول/كغ) وفي المكتوك (الجلد والدهن، اللذين يحتويان أيضاً على فيتامين C بما يعادل ثمرة الجريفون Grapefruit) ولدت أكثر من 2.000 ضعف الطاقة المكتسبة من الصيد البري.

صحيح أن عائدات الطاقة كانت أقل، لكنها ظلت مع ذلك عالية علواً غير مألوف بسبب استغلال قبائل الساحل الشمالي الغربي من المحيط الهادي لهجرات سمك السلمون السنوية: فكثافة الأسماك العائدة بعكس التيار كانت غالباً عالية جداً وما كان على الصيادين سوى غرفها من الماء ووضعها في القوارب أو على الشاطئ. لقد قدمت عائدات الطاقة العالية هذه دعماً للمستوطنات الضخمة الدائمة وزادت التعقيد الاجتماعي والابتكار الفني (الطواطم الخشبية الكبيرة). لكن القيود على النمو السكاني ما لبثت أن فرضت على هذه المستوطنات الساحلية بسبب ضرورة اصطياد أنواع بحرية وبرية أخرى بهدف تأمين المواد الأولية للملابس، والأسرة، ومعدات الصيد.

أننا ما زلنا نعجز عن إعادة بناء التركيب الذي يمثل الحياة ما قبل الزراعية. وينبغي ألا يكون هذا باعثاً على الدهشة (هنري Henry، بروكس Brooks، وبيبيرنو Piperno أ2014). فبقايا النبات القابلة للتحلل السريع التي يخلفها استهلاك الطعام نادراً ما تبقى عشرات الآلاف من السنين، ولا تبقى أبداً تقريباً ملايين السنين، ما يجعل حساب نصيب الطعام النباتي في نظام غذائي أنموذجي عملية صعبة. أما العظام فغالباً ما تبقى، لكن تراكمها الناتج عن عمليات افتراس الحيوانات يجب تمييزه بحرص عن استخدام أشباه البشر لها، وحتى في تلك الحال، يستحيل معرفة مدى تمثيلها لأنظمة غذائية بعينها.

وكما يلاحظ بريور Pryor وفريقه (2013) فإن الصورة التي حظيت بالقبول على نطاق واسع والتي تبين الصيادين وجامعي الثمار في العصر الحجري الأعلى بوصفهم صيادين أكفاء يصطادون الثدييات الضخمة ويسكنون مناطق لا شجر فيها مردها إلى سوء الحفاظ على البقايا النباتية في مثل هذه المواقع القديمة. لقد بينت دراستهم أن إمكانية احتواء مثل هذه المواقع على بقايا حفرية كبيرة للنباتات التي استهلكها البشر لم تقدر حق قدرها، وأن «القدرة على استغلال الأطعمة النباتية ربما كانت أحد المكونات الحيوية في نجاح استعمار تلك المناطق الأوروبية الباردة» (بريور وآخرون 2013، 971). لقد قام هنري وبروكس وبيبيرنو (2014) بتحليل بقايا مجهرية نباتية - مثل دقيق النشاء والمستحاثات النباتية - وجدت في حصى الأسنان وعلى الأدوات الحجرية واستنتجوا أن الإنسان الحديث ومعاصريه من جماعات نياندرتال كانوا يستهلكون أطعمة نباتية مماثلة على نطاق واسع بما فيها الجذمورات وبذور الأعشاب.

وتعد التحولات في قامة الجسم وكتلته وفي سمات الجمجمة (نحافة الفك السفلي) أدلة غير مباشرة على النظام الغذائي السائد وربما ظهرت نتيجة المزج بين أطعمة عدة. ولا يمكننا الربط بين ما اكتشف من أدوات حجرية كانت تستعمل في قتل الحيوانات وذبحها بمتوسط ما يتناوله الفرد من اللحم على فترات طويلة من الزمن، لذا فإنه ليس لنا سوى النظير المستقر المباشر (نسب الكربون أ$^{13}C/^{12}C$ والنيتروجين أ$^{15}N/^{14}N$) دليلاً يعرفنا بمصادر البروتين طويلة الأجل ومستوياتها الغذائية وأصولها البرية والبحرية؛ ويميز الكتلة النباتية المركبة بالطريقين الرئيسين (C3 وC4) وبكائنات غيرية التغذية تتغذى على هذه النباتات وتخبرنا عن تركيب النظام الغذائي بمجمله. إلا أنه يتعذر علينا ترجمة تلك الدراسات إلى نماذج يعتمد عليها لمعدلات المواد الغذائية الكبيرة المستهلكة (الكربوهيدرات، والبروتينات، والدهون) مع أن المعطيات المتوافرة من النظائر المشعة تبين أن البروتين الحيواني كان خلال العصر الجرافيتي في أوروبا المصدر الرئيس للبروتين في النظام الغذائي، بينما شكلت الأنواع المائية نحو 20% من المجموع الإجمالي، بل وأكثر، في المواقع الساحلية (هبلين Hublin وريتشاردز Richards أ2009).

قبل أن نترك الأنظمة التي مدت الصيادين وجامعي الثمار بالطاقة ينبغي أن أشير إلى أن الصيد وجمع الثمار ظل يلعب دوراً مهماً في سائر المجتمعات الزراعية القديمة. ففي جاتال هويوك، وهي مستوطنة زراعية كبيرة من العصر الحجري الجديد في سهل قونيا ترجع إلى 7200 عام قبل الميلاد كان لدى المزارعين الأوائل أنظمة غذائية قوامها الحبوب والنباتات البرية، إلا أن الحفريات كشفت عن عظام طرائد مثل الأوركة الكبيرة، والثعالب، والغرير، والأرانب البرية (أتالاي Atalay وهاستورف Hastorf أ2006). أما في تل أبي هريرة في شمال سورية فقد ظل الصيد مصدراً حيوياً للطعام على مدى 1.000 عام من بداية تدجين النباتات (ليغه Legge ورولي - كونوي Rowley-Conwy أ1987). وفي الفترة التي سبقت عصر الأسر الحاكمة في مصر (3100 قبل الميلاد) كان صيد البط، والأيائل، والخنازير البرية، والتماسيح، والفيلة يكمل زراعة القمح ثنائي الحبة والشعير (هارتمان Hartmann أ1923؛ يانك Janick أ2002).

لِـمَ بدأ بعض الصيادين وجامعي الثمار بممارسة الزراعة؟ ولِـمَ انتشرت هذه الممارسات الجديدة على نطـاق واسـع؟ ولِـمَ كان تبنيها سريعاً على مقاييس التطور؟ من الممكن تجاوز هذه الأسئلة الشائكة إذا اتفقنا مع رندوس Rindos أ(1984) بأنه ليس للزراعة سبب بعينه، بل نشأت من العديد من التفاعلات المتداخلة، أو كما عبر عن ذلك برونسون Bronson أ(1977، 44) قائلاً: «إن لدينا نظاماً معقداً متعدد الوجوه وقابلاً للتكيف، وفي النظم البشرية القابلة للتكيف... لا وجود لأسباب منفردة شاملة الكفاءة». إلا أن العديد من علماء الأنثروبولوجيا، والبيئة والمؤرخين كانوا يبحثون عن هذه الأسباب الرئيسة بالتحديد. وقد نشر الكثير من الأعمال التي تضم نظريات تفسيرية متنوعة تتناول أصل الزراعة (كوهين Cohen أ1977؛ بريور 1983؛ رندوس 1984؛ وايت White ودنهام Denham أ2006؛ غلسن Gehlsen أ2009؛ برايس وبار يوسف Bar - Yosef أ2011).

إن توافر دليل قاطع حول الطبيعة التطورية للتقدم الزراعي يسهم في تقليص الاحتمالات. ويكمن أقوى تفسير مقنع حول أصول الزراعة في الجمع بين النمو السكاني والضغط البيئي، أي في الاعتراف بأن ثمة عوامل طبيعية واجتماعية كانت وراء الانتقال إلى الزراعة الدائمة (كوهين 1977). وقد ذكر ريتشرسون Richerson، وبويد Boyd وبيتنغر Bettinger أ(2001) أنه نظراً لشدة البرودة وانخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون انخفاضاً كبيراً في العصر الحجري المتأخر، وبسبب تغير هذه الظروف بتأثير الحرارة التي أعقبت البرودة، فقد كانت الزراعة مستحيلة في حقبة البليستوسين Pleistocene لكنها صارت لا غنى عنها في حقبة الهولوسين Holocene. وما يدعم هذا الطرح أن الزراعة بين 10.000 و5.000 عام خلت، تطورت تطوراً مستقلاً في سبعة مواقع على الأقل في قارات ثلاث (أرميلاغوس Armelagos وهاربر Harper أ2005).

حيث إن زراعة المحاصيل هي بالأساس جهد يبذل لضمان مؤونة مناسبة من الطعام، لذا كان من الممكن تفسير أصل الزراعة على أنه مثال آخر من متطلبات الطاقة الضرورية. فتناقص العائدات من جمع الثمار والصيد أدى إلى انقراض تدريجي في زراعة المحاصيل التمهيدية التي عرفتها كثير من المجتمعات الرعوية. وكما أسلفنا فإن الصيد وجمع الثمار والزراعة كانا موجودين جنباً إلى جنب بحصص مختلفة من مخرجات الطعام مدة طويلة من الزمن. لكن ما من تفسير منطقي لأصول الزراعة يستطيع إهمال ميزات الزراعة الاجتماعية المتعددة. فزراعة المحاصيل عند الحضر كانت طريقة فعالة لبقاء الناس معاً، وسهلت الحفاظ على أسر كبيرة وجمع ممتلكات مادية وتنظيم عمليتي الدفاع والهجوم.

بل ويرى أورمي (1977) أن إنتاج الطعام ربما لم يكن هدفاً مهماً في حد ذاته، لكن ما لا شك فيه أن ظهور الزراعة وانتشارها كانت له عوامل مشتركة بالغة الأهمية. فكل تفسير مبسط يعتمد الطاقة أصولاً للزراعة يضعف أمام حقيقة أخرى تفيد بأن صافي عائدات الطاقة الناتجة عن الزراعة في أوائل عهدها غالباً ما كانت أدنى من عائدات نشاطات الصيد والجمع التي سبقتها أو عاصرتها. فبالمقارنة مع الصيد وجمع الثمار، كانت الزراعة في أوائل عهدها تتطلب جهداً عضلياً أكبر - لكن كان في مقدورها دعم كثافات سكانية أعلى وتوفير كمية أكبر من الطعام يعتمد عليها. وهذا يفسر سبب حفاظ مجتمعات الصيد والجمع على التفاعل (وغالباً على التجارة) مع الجماعات الزراعية المجاورة على مدى آلاف أو على الأقل مئات السنين قبل أن تتبنى الزراعة المستدامة (هدلاند وريد 1989).

ليس ثمة مركز تدجين وحيد انطلقت منه المزروعات والحيوانات المنتجة للحليب واللحم، لكن أهم منطقة لأصل الزراعة في العالم القديم لم تكن، كما كان يعتقد سابقاً، جنوب بلاد الشام، بل الأراضي الواقعة شمال نهري دجلة والفرات (زيدر Zeser أ2011). وهذا يعني أن إنتاج الطعام بدأ على أطراف المناطق المفضلة وليس داخلها. فالسجل النباتي من شوغا جولان Chogha Golan في تلال جبال زغروس الإيرانية يعطينا أحدث إثبات لهذه الحقيقة (ريل Reihl، زيدي Zeidi، وكونراد Conrad أ2013): إن زراعة الشعير البري (هورديوم سبونتانيوم Hordeum spontaneum) بدأت في تلك المناطق قبل نحو 11.500 عام، وتبعتها فيما بعد زراعة القمح البري والعدس البري.

وفيما يخص العملية، فإن من الأهمية بمكان التأكيد على عدم وجود عتبات واضحة أو فواصل حادة بين الصيد وجمع الثمار والزراعة على اعتبار أن ثمة فترات طويلة من معالجة النباتات البرية والحيوانات تسبق تدجينها الحقيقي الذي يتميز بتغيرات تركيبية واضحة. وعلى النقيض من الفهم السابق، فإن تدجين النبات والحيوان حدث بشكل متزامن تقريباً وأنتج ترتيباً فعالاً وسريعاً إلى حد ما (زيدر 2011). ويعود أقدم تاريخ تقريبي لأول ظهور إلى نحو 11.500 - 10.000 عام بالنسبة إلى فصيلة النبات المعروفة باسم القمح ثنائي الحبة (Triticum dicoccum) والقمح أحادي الحبة (Triticum monococcum) والشعير (Hordeum Vulgare) في الشرق الأوسط (الشكل 2-4)، و10.000 عام للدخن الصيني (Setaria italica) و7.000 عام للأرز (Oryza sativa) و10.000 عام للقرع المكسيكي (فصيلة Cucurbita) و9.000 عام للذرة الصفراء (Zea Mays) و7.000 عام للبطاطا الأنديزية Solanum tuberosum (برايس وبار - يوسف 2011). أما أول عملية تدجين للحيوانات فتعود إلى 15.000 - 9.000 عام بدءاً بالماعز والغنم ثم البقر والخنازير.

ثمة تفسيران أساسيان لانتقال أوروبا إلى الزراعة يقضيان بأنه كان نتيجة نشاط محلي يدعمه التقليد (الانتشار الثقافي) أو بدافع التباعد (الانتشار السكاني). وقد تمخضت عملية تأريخ بالكربون المشع لمواد من مواقع تعود إلى العصر الحجري الحديث أجراها بنهاسي Pinhasi، فورت Fort وأمرمان Ammerman أ(2005) عن نتائج تتماشى مع فرضية الانتشار السكاني الذي انطلق على الأرجح من شمال بلاد الشام وبلاد ما بين النهرين واتجه شمالاً بسرعة متوسطة بلغت 0.6 - 1.1 كم/سنة. ويدعم هذه النتيجة مقارنات سلاسل الحامض النووي DNA للمتقدرات (الحبيبات الخيطية mitochondria) من الهياكل العظمية للصيادين وجامعي الثمار وأوائل المزارعين الأوروبيين في العصر الحديث: فهي تبين بطريقة لا يرقى إليها الشك أن المزارعين الأوائل لم ينحدروا من جامعي الثمار المحليين، بل كانوا قد هاجروا في مطلع العصر الحجري الحديث (برامنتي وآخرون Bramanti et al).

اتخذت الزراعة في مراحلها الأولى شكلاً متنقلاً (ألن Allan أ1965؛ سبنسر Spencer أ1966؛ كلارك Clark وهازويل Haswell أ1970؛ وترز Watters أ1971؛ غريغ



الشكل 2-4

أقدم الحبوب المدجنة أ - ج. القمح ثنائي الحبة (*Triticum dicoccum*)، القمح أحادي الحبة (*Triticum monococcum*) والشعير (*Hordeum vulgare*) كانت أساس أصول الزراعة في الشرق الأوسط (Corbis).

Grigg أ1974؛ أوكيغبو Okigbo أ1984؛ بوز Bose أ1991؛ كيرنز Cairns أ2015). وقد عملت هذه الممارسة على اتباع دورات زراعية قصيرة (1 - 3 سنوات) مع فترات راحة طويلة للأرض (عشر سنوات أو أكثر). وعلى الرغم من الاختلافات الكثيرة (التي يمليها النظام البيئي، والمناخ، والمحاصيل السائدة) كانت هناك أوجه تشابه كثيرة، معظمها مدفوع بالسعي إلى الإقلال من مصروف الطاقة إلى أدنى حد. بدأت الدورة بإزالة النباتات الطبيعية، وغالباً ما كان جزها أو حرقها يفي بغرض إعداد السطح للزراعة. وللإقلال من مسافة المشي كانت الحقول أو البساتين مفتوحة أو على مقربة من المستوطنات ما أمكن، كما كانت إزالة النباتات الثانوية خياراً مفضلاً: فعلى سبيل المثال وجد رابابورت Rappaport أ(1968) أن واحداً فقط من 381 بستاناً في تسمباغا Tsembaga (غينيا الجديدة) أزيل في غابة عذراء. وكان ضرورياً تسوير بعض قطع الأرض لمنع الضرر الذي قد تلحقه بها الحيوانات. في تلك الحال، وجِد أن قطع الأشجار يستهلك أكبر قدر من العمل. وقد أدى الاحتراق إلى ضياع كمية كبيرة من النيتروجين النباتي، لكن المواد المعدنية المغذية زادت خصوبة التربة.

كان الرجال يقومون بالأعمال الشاقة (في غياب الأدوات الجيدة كانت النباتات تحرق وحسب، وكان من الضروري قطع بعض الأشجار لصنع السياج) أما عمل النساء فكان معظمه محصوراً بالتعشيب والحصاد، وكانت الحبوب والبطاطا المحاصيل الرئيسة نظراً لغزارة إنتاجها (رابابورت 1968). وفي كل المناطق الدافئة، كان الفلاحون يزرعون أكثر من محصول في حقل واحد، وبالأخص في البساتين كثيفة المحاصيل؛ وبالتالي كانت عمليات الحصاد تتم في أوقات متباينة. وحظيت الزراعة المتنقلة بالأهمية في القارات كافة عدا أستراليا. ففي أمريكا الجنوبية (على الغالب بين 500 قبل الميلاد و1000 بعد الميلاد) تركت ممارستها القديمة بصماتها عبر حوض الأمازون على شكل تربة سوداء داكنة يصل عمقها إلى مترين فيها خشب متفحم وبقايا محاصيل، ونفايات وعظام بشرية (غليسر Glaser أ2007؛ شونكيرا Junqueira، شبرد Shepard، وكليمنت Clement أ2010). أما في أمريكا الشمالية فامتدت شمالاً حتى وصلت إلى كندا حيث زرع شعب الهورون الذرة والفاصولياء في دورات زراعية متبادلة طويلة تكفي لإطعام 10 -12 فرداً/هكتار (هايدنرايخ Heidenreich أ1971).

في المناطق الشاسعة وقليلة السكان كانت الممارسة جزءاً ملائماً من سلسلة التطور من مرحلة الصيد والجمع إلى الزراعة الدائمة. إلا أن تقلص الأراضي المتاحة، وتدهور البيئة، والضغط المتزايد نحو زيادة كثافة المحاصيل قللت من أهميتها تدريجياً، كما تفاوت صافي عائدات الطاقة. فمحاصيل البساتين في تسمباغا في مرتفعات غينيا الجديدة كانت تعطي 16 ضعفاً من عائدات الطاقة تقريباً (رابابورت 1968). كما وجدت دراسة أخرى أجريت في غينيا الجديدة عائدات لا تزيد على 6 - 10 أضعاف (نورغان Norgan وآخرون 1974) - لكن محصول الذرة الصفراء في كيكشي مايا Kekchi Maya (غواتيمالا) أعطى ما لا يقل عن 30 ضعفاً من عائدات الطاقة (كارتر Carter أ1969). لقد كان معظم صافي عائدات الحبوب الصغيرة 11 - 15، و20 - 40 بالنسبة إلى غالبية محاصيل الجذور، والموز، والذرة الصفراء، في حين حققت بعض الجذور والبقول 70 ضعفاً كحد أقصى (المربع 9-2). فإطعام شخص واحد تطلب في الغالب إزالة النباتات البرية بانتظام من 2 -10 هكتارات من الأرض بحيث تتراوح مساحة الأرض المزروعة فعلياً بين 0.1 و1 هكتار/شخص. وحتى الزراعة المنتجة المتنقلة باعتدال كانت تدعم كثافات سكانية أعلى ما كانت تدعمه أفضل حالات الصيد والجمع.

المربع 9-2

تكاليف الطاقة وكثافات السكان في الزراعة المتنقلة

يستعمل صافي تكاليف الطاقة في حساب عائدات الزراعة المتنقلة. وأفترض أن متوسط مدخل العمل يتطلب 700 كيلو جول/سا. أما المخرجات فهي كميات الحصاد القابلة للأكل غير المصححة بما يضع في الاعتبار خسائر التخزين وحاجات البذور.

الكثافات السكانية شخص/هكتار	عائدات الطاقة	مدخلات الطاقة (الساعات)	المحاصيل الرئيسة	السكان
0.6	15 - 20	2.000 -2.500	البطاطا	جنوب شرق آسيا
0.5	15 - 20	3.200 -2.800	الأرز	جنوب شرق آسيا
0.3- 0.4	20 -10	1.200- 800	الدخن	غرب أفريقيا
0.3 - 0.4	25- 40	600- 1.000	الذرة	أمريكا الوسطى
0.2- 0.3	25030	600- 800	الذرة	أمريكا الشمالية

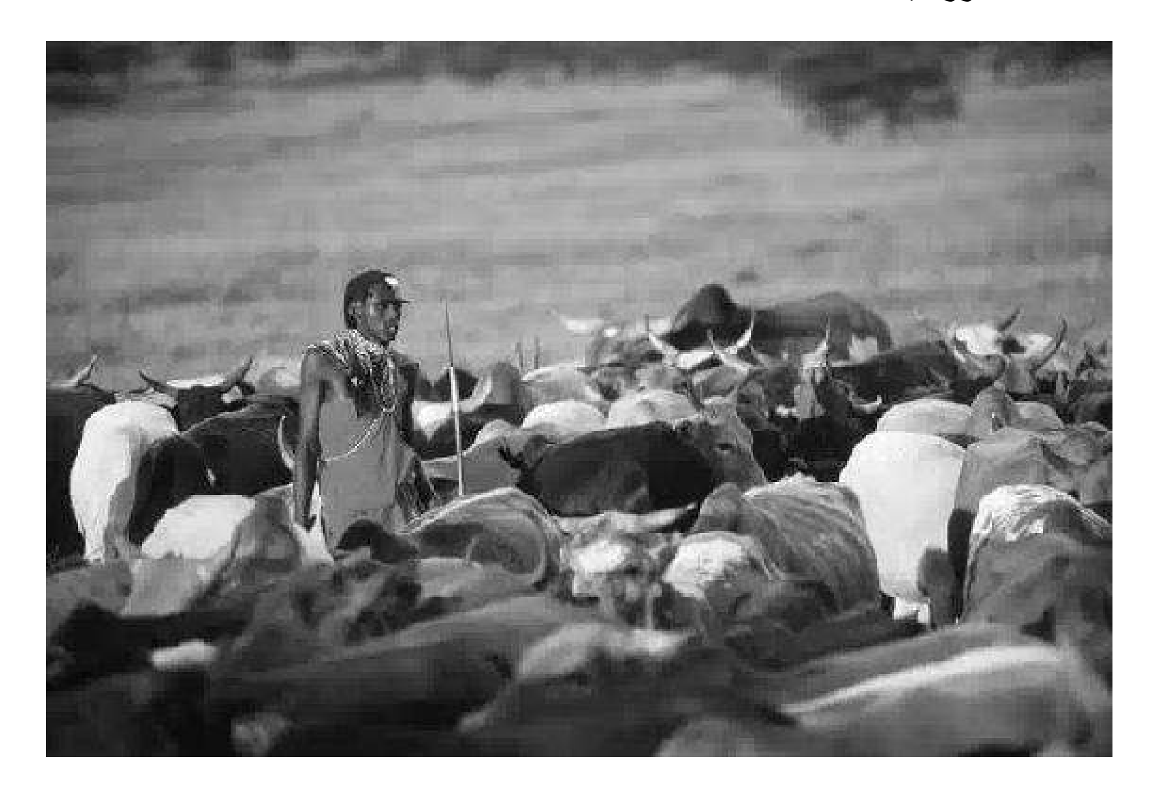
المصادر: أخذت الحسابات من معطيات في كونكلين Conklin أ(1957)، ألن (1965)، رابابورت (1968)، كارتر (1969)، كلارك وهاويل (1970)، هايدنرايخ (1971)، ترب Thrupp وفريقه (1997) وكومز Coomes، غيرمارد Girmard وبيرت Burt أ(200).

لكن مع انحباس المطر، أو انقطاعه لفترات طويلة، صارت الزراعة غير مجدية أو مستحيلة، وكان الرعي البدوي بديلاً فعالاً (أيونز Irons ودايسون - هدسون Dyson-Hudson أ1972؛ غالاتي Galaty وسالزمان Salzman أ1981؛ إيفانجلو Evangelou أ1984؛ خازانوف Khazanov أ2001؛ سالزمان 2004). فالرعي المنظم كان الأساس المفعم بالطاقة لدى عشرات المجتمعات القديمة في العالم، وبالرغم من أن بعضها بقيت فقيرة ومنعزلة، إلا أن مجتمعات أخرى كانت بين أكثر الغزاة عنفاً في التاريخ: فجماعات شيونغو Xiongnu ظلت لمئات السنين في صراع مع بواكير الأسر الصينية، كما وصل الغزو المغولي حتى تخوم ما يعرف اليوم بهنغاريا وبولندا.

وتعد تربية الحيوان شكلاً من أشكال الحفاظ على الفريسة، أي استراتيجية الحصاد المؤجل الذي تكون كلفة تربيته أعلى بالنسبة إلى الحيوانات الضخمة لاسيما من فصيلة الأبقار (ألفارد Alvard وكوزنار Kuznar أ2001). صحيح أن الحيوانات الكبيرة هي المفضلة، لكن معدلات النمو الأعلى تميل نحو الغنم والماعز. تستطيع الحيوانات تحويل الأعشاب إلى حليب، ولحم، ودم من دون الحاجة إلى كثير من الطاقة البشرية (الشكل 2-5). وكان جهد الرعاة مقتصراً على رعي الحيوانات، وحمايتها من الضواري، وسقياها، ومساعدتها عند الولادة، وحلبها بانتظام،

وذبحها بين فينة وأخرى، وأحياناً بناء حظائر مؤقتة. أما الكثافات السكانية لمثل هذه المجتمعات فلم تتجاوز تلك السائدة في جماعات الصيد وجمع الثمار (المربع 2-10).

منذ آلاف السنين ساد الرعي البدوي أنحاء أوروبا والشرق الأوسط وأجزاء واسعة من أفريقيا وآسيا. ففي كل هذه الأماكن كان يمتزج أحياناً بخليط من الزراعة الرعوية شبه البدوية، لاسيما في بعض أجزاء أفريقيا مع مكون كبير من الصيد والجمع. وبعض هؤلاء الرعاة، ممن كان يحاوطهم المزارعون أصحاب الإنتاج الغزير، وممن كانوا يعتمدون على عادة المقايضة مع مجتمعات الحضر، لم يكن لهم تأثير كبير خارج نطاق عالمهم. لكن كثيراً من الجماعات مارست تأثيراً كبيراً في تاريخ العالم القديم من خلال غزواتها المتكررة وسيطرتها المؤقتة على المجتمعات الزراعية



الشكل 2-5

راعٍ من المساي مع قطيعه (Corbis).

(غروست Grousset أ1938؛ خازانوف 2001). وما زال بعض الرعاة الخالصين والرعاة المزارعين موجودين حتى اليوم - وبالأخص في آسيا الوسطى وفي أفريقيا السواحلية [14]Sahelian] وشرق أفريقيا - لكنهم يعانون من تهميش متزايد.

المربع 2-10

البدو الرعاة

أوضح هيلاند Helland أ(1980) متطلبات العمل الضئيلة في المجتمعات الرعوية من خلال الإشارة إلى الأعداد الكبيرة من أنواع الماشية التي يسوقها راع واحد في شرق أفريقيا وقال إنها تصل إلى 100 جمل، و200 بقرة، و400 نعجة ومعزاة. ونرى خزانوف يذكر أعداداً مشابهة بالنسبة إلى الرعاة الآسيويين: راعيان على صهوتي حصانيهما يسوقان 2.000 نعجة في منغوليا، وراع رجل وآخر يافع يرعيان 400 - 800 بقرة في تركمانيا. إن ميزة قلة العمل الذي يحتاجة الرعي كان من الأسباب الرئيسة التي جعلت كثيراً من الرعاة يترددون في التخلي عن الترحال والتحول إلى حياة المزارعين الحضر. ونتيجة لذلك نرى أن كثيراً من المجتمعات البدوية ظلت على مدى أجيال تعيش جنباً إلى جنب مع المزارعين الحضر ولم تتخل عن قطعانها إلا بسبب جفاف قاتل أو خسارة كبيرة نزلت بالمراعي الموجودة.

كان النصيب الأدنى للفرد في الحياة الرعوية 5 - 6 بقرات، 2.5 - 3 جمال، أو 25 - 30 معزاة أو نعجة. ويفسر امتلاك أعداد أكبر من هذا بكثير من الأبقار عند المساي التقليديين (13-16 بقرة/فرد) بالمتطلبات القليلة لجمع الدماء الذي كان يتم ببزل الوريد الوداجي المشدود وسحب 2 - 4 ليترات من الدم كل 5 - 6 أسابيع. وفي أوقات الجفاف كانت هناك حاجة إلى 80 بقرة لجمع الدم لأسرة من 5 -6 أفراد، أو 13 - 16 حيواناً/ فرداً (إيفانجلو 1984). وفي سائر الحالات، كانت كثافات السكان البدو منخفضة بالمقارنة مع أولئك المزارعين الذين تحولوا إلى حياة الحضر في شرق أفريقيا بين 0.8 - 2.2 فرد/كم^2، و0.03 - 0.14 رأس/هكتار (هيلاند 1980؛ هوموود Homewood أ2008).

الفصل الثالث
الزراعة التقليدية

رغم تعذر تفسير التحول من حياة الصيد والجمع إلى الزراعة اعتماداً على ضرورات الطاقة وحدها، إلا أن من الممكن اعتبار تطور الزراعة استمراراً للجهود الرامية إلى زيادة إنتاجية الأرض (بهدف زيادة حصيلة الطاقة الغذائية) لكي تستوعب المزيد من السكان. وحتى ضمن ذلك الإطار المصغر، علينا ألا ننسى عوامل أخرى لا صلة لها بالطاقة (مثل توافر كمية مناسبة من المواد الغذائية الدقيقة، والفيتامينات، والمعادن)، لكن بالنظر إلى كون الأنظمة الغذائية نباتية في معظمها في المجتمعات الفلاحية التقليدية كافة، فإن التركيز على مخرجات الطاقة الغذائية المنتجة في المحاصيل الأساسية بصفة عامة والحبوب بصفة خاصة لا يعد تبسيطاً يشتت الانتباه.

ولا شيء سوى الحبوب يجمع بين وفرة المحصول - نحو 500 كغ/هكتار على أقل تقدير؛ وأكثر من 2 طن/هكتار في أكثر صنوف الزراعة التكثيفية التقليدية على أكثر تقدير- وبين ارتفاع نسبة المواد الكربوهيدراتية سهلة الهضم ومستوى عال معتدل من البروتينات (بعضها، وبالأخص الذرة الصفراء، يحتوي أيضاً على كميات كبيرة من الدهون). وتبلغ كثافة طاقة الحبوب عند نضجها خمسة أضعاف كثافة البطاطا الطازجة (15-16 ميغا جول/كغ). كما أن تدني نسبة الرطوبة فيها بعد تجفيفها بالهواء يسمح بتخزينها لفترات طويلة (سواء في أوعية بالمنازل أو في المخازن على نطاق واسع). والحبوب الأساسية سريعة النضج -فالأنواع التقليدية تحتاج إلى 100-150 يوماً للنضج- لتسمح بزيادة إنتاجية الغذاء من خلال الدورات السنوية مع المحاصيل الأخرى (وبالأخص بذور الزيت والبقوليات) أو من خلال ازدواجية محصول الحبوب.

لقد تصور بوزرب Boserup أ(1965، 1976) أن العلاقة بين طاقة الغذاء وتطور المجتمعات الفلاحية مسألة اختيار. فحين يحقق نظام زراعي معين حدود إنتاجيته، يستطيع الناس أن يقرروا إما الرحيل أو البقاء والعمل على استقرار أعدادهم، أو البقاء والسماح لأعدادهم بالتقلص -أو تبني طريقة أكثر إنتاجية للزراعة. وليس من الضروري أن يكون الاختيار الأخير مفضلاً أو محتملاً أكثر من الحلول الأخرى، فاختياره غالباً ما يؤجل أو يقع عليه الاختيار بعد شيء من التردد لأن انتقالاً كهذا يتطلب على الدوام مدخلات طاقة أعلى- وفي معظم الحالات من الجهد الآدمي والحيواني. إن زيادة الإنتاجية تدعم أعداداً أكبر من السكان من خلال زراعة المساحات ذاتها، لكن صافي عائدات الطاقة من الزراعة المكثفة قد لا يزيد، بل قد يتراجع في واقع الأمر.

إن التردد في توسعة الأرض المزروعة أدى إلى تأخر استصلاح الأراضي الهامشية (وهو اختيار يعني مدخلات طاقة أعلى، بدءاً بإزالة الغابات الحراجية، وتجفيف المستنقعات، أو بناء الحقول المدرجة). كانت قرى أوروبا الكارولينجية[15] مكتظة بالسكان، كما كان هناك نقص حاد في

كميات الحبوب، لكن الحقول الجديدة لم تعمل إلا في أجزاء من ألمانيا وفلاندرز في الأماكن الزراعية الصعبة (ديوبي Duby أ1968). في العصر الوسيط شهدت أوروبا موجات نزوح الفلاحين الألمان من المناطق المكتظة بالسكان لكي يفتحوا أراضيَ زراعية جديدة في مناطق الغابات والأعشاب في بوهيميا، وبولندا، ورومانيا، وروسيا التي رغب عنها المزارعون في المناطق المجاورة. وبالمثل، نرى أن الصين لم تبدأ في استعمار المناطق الخصبة والباردة في الشمال الشرقي (منشوريا) إلا في القرن الثامن عشر، وحتى في الوقت الحالي، نجد أن الزراعة في الجزر الإندونيسية المترامية الأطراف قليلة الكثافة بالمقارنة مع الإنتاجية العالية في جاوة المكتظة بالسكان. لقد تطلب الانتقال من الإراحة السنوية المنتظمة والممتدة إلى الزراعة السنوية ومنها إلى زراعة المحاصيل المتعددة آلاف السنين في كل مكان.

لكن رغم الاختلافات المتعددة في الممارسات الزراعية والمحاصيل المزروعة، نرى أن الزراعات التقليدية تشترك كلها في أسس زراعية واحدة. فكلها كانت تدار بعملية التمثيل الضوئي أي تحويل الإشعاع الشمسي وإنتاج الطعام للناس، والعلف للحيوانات، وإعادة تدوير الفضلات لتعويض خصوبة التربة، والوقود لصهر المعادن الضرورية لصنع أدوات الزراعة البسيطة. ونتيجة لهذا، كانت الزراعة التقليدية من حيث المبدأ قابلة للتجديد تجديداً كاملاً. وفي الواقع فإنها كثيراً ما كانت تؤدي إلى انحسار المخزون من الطاقة المتراكمة، خاصةً في مراحلها الأولية إثر إعداد أرض زراعية جديدة لتحل محل الغابات الحراجية على نطاق واسع. على أي حال، كان المشروع بأكمله يعتمد اعتماداً فعلياً على تحويل تدفق الطاقة الشمسية (مع فترات تأخير أنموذجية تتراوح بين بضعة أشهر وهي الفترة المطلوبة لحصاد المحاصيل، وعقود عدة قبل قطع الأشجار مكتملة النمو).

لكن حتى حين حلت الزراعة محل الأراضي العشبية الطبيعية (وهذا يعني الإقلال من الخسائر في الكتلة النباتية) لم تستطع قابلية التجديد أن تضمن الاستدامة. فسوء الممارسات الزراعية أضعف خصوبة التربة أو ضاعف تأثير التعرية أو التصحر، ما أدى إلى تراجع الغلال، وحتى إلى التخلي عن الزراعة بأكملها. وفي معظم الأقاليم تطورت الزراعة التقليدية من زراعة انتشارية إلى زراعة تكثيفية. أما مشغلوها الأساسيون -عضلات البشر أو الحيوانات- فلم يتغيروا لآلاف السنين، مع أن الممارسات الزراعية، وأنواع المزروعات وتنظيم العمل تغيرت تغيراً كبيراً. وهكذا يترك كل من الثبات والتغير بصمته على تاريخ الزراعة التقليدية.

صحيح أن التكثيف المتقدم للزراعة دعم معدلات كثافة سكانية عالية، لكنه كان بحاجة إلى مصروف أعلى من الطاقة، لا لنشاطات الزراعة المباشرة وحسب، بل لإجراءات إسناد مهمة أيضاً مثل حفر الآبار، وبناء قنوات الري، والطرق، ومنشآت التخزين، ومدرجات الحقول. وقد تطلبت هذه التطورات بدورها مزيداً من الطاقة لصنع معدات جديدة أفضل من سابقتها، وآلات بسيطة تدار بوساطة الحيوانات المحلية أو بطاقة الماء أو الرياح. أما الزراعة الأكثف، فكانت تعتمد على جهد الحيوانات لاسيما في الحراثة، وهي أكثر أعمال الحقل حاجة للطاقة. لقد كانت أمريكا الوسطى والجنوبية حالتين استثنائيتين. فلا المزارعون في أمريكا الوسطى، ولا الإنكا منتجو البطاطا والذرة كانت لديهم حيوانات جر. فتربية الحيوانات الأليفة كانت بحاجة إلى

محاصيل أكثف لإنتاج العلف. كانت الحيوانات تُستعمل أيضاً على نطاق واسع للقيام بمهمات كثيرة أخرى في الحقل وفي دراسة الحبوب وطحنها، وما كان بالإمكان الاستغناء عنها في عملية توزيع الطعام بين منطقة وأخرى. فتهيئة الحظائر لهذه الحيوانات، وتقديم العلف إليها، وإنتاج أعنتها، وحدواتها، وما إلى ذلك أسفر عن تعقيدات ومهارات جديدة.

لكن لم تكن لكل الخطوات نحو الزراعة التكثيفية طاقة مكثفة مثل تعدد المحاصيل، الأمر الذي مارس ضغطاً متكرراً على العمال خلال فترات الزرع والحصاد. ومع زيادة الاعتماد على حيوانات الجر القوية زاد الطلب على الأرض التي تنتج أعلافها، أو وجب دعمها من خلال بناء قنوات الري وصيانتها، وهذا عمل يتطلب جهداً كبيراً متكرراً. وعلى سبيل التشبيه الميكانيكي نجد أن بعض التغيرات التي أتاحت تسخير قسط أكبر من القدرة الضوئية المتاحة تضمنت فتح بوابات مهمة لا علاقة لها بالطاقة (صمامات) كانت تغذي التدفقات الموجودة أو تمنع تحويلها عملياً إلى كتلة نباتية قابلة للهضم.

ربما كان توافر النيتروجين، وهو المادة الغذائية المحورية للنبات، أهم مثال عن هذا التأثير، فدورة المحاصيل البقولية المثبتة للنيتروجين مع الحبوب والدرن زادت إجمالي مخرجات الطعام، وفي الوقت ذاته جلبت فوائد مهمة في المنظومة الزراعية البيئية. وبالمثل، فإن التقدم في تصميم أجهزة الري واستخدام السلالات المحسنة وأنواع جديدة من المحاصيل ساعد على تحسين الإنتاجية والمحاصيل السنوية. ولم تجلب الزراعة التكثيفية بدورها فوائد في مجال الطاقة وحسب (المزيد من الأكل والعلف)، بل أسهمت أيضاً في تقدم الحضارة ما قبل الصناعية على اعتبار أنها كانت بحاجة إلى تخطيط واستثمار طويل الأجل وإلى تنظيم متطور للعمل حتى حين كانت تدعم الاندماج الاجتماعي والاقتصادي على أوسع نطاق.

وبالطبع، فإنه ما كل أشكال تكثيف الزراعة تتطلب تنظيماً وإشرافاً مركزياً، فحفر آبار أو قنوات قصيرة ضحلة أو بناء بضعة مدرجات أو حقول مرتفعة كثيراً ما نشأ مع الأسر الفلاحية المنفردة أو القرى. لكن النطاق المتزايد لهذه النشاطات تطلب في نهاية الأمر تنسيقاً هرمياً وإدارة خارج الإدارة المحلية. كما أن الحاجة إلى المزيد من مصادر الطاقة القوية لمعالجة كميات أكبر من الحبوب وبذور الزيت للمدن النامية شكل دافعاً مهماً لتطوير أول البدائل المهمة لعضلات الإنسان والحيوان، وتمثل هذا في استخدام الماء وتيارات الرياح لتذرية القمح وعصر بذور الزيت. لقد تمخضت آلاف السنين من الزراعة عن طائفة واسعة من أنماط العمل والإنتاجية ضمن حدود الممارسات الزراعية المشتركة وضرورات الطاقة الشائعة.

وشملت العموميات الرئيسة العمليات الأساسية في الحقول بالإضافة إلى تلك التي تتبع موسم الحصاد، كما أدت إلى سيطرة واسعة النطاق للحبوب في الزراعة، وسلاسل من دورات الإنتاج تحددها بصفة أساس الظروف البيئية. وهناك أربع خطوات رئيسة لتحقيق تكثيف الزراعة التقليدية: رفع كفاءة جهد الحيوان المستعمل، التقدم في مجال الري، زيادة التخصيب، وتدوير المحاصيل وتنويع المزروعات. وبالرغم من تعدد القيود البيئية والفنية فقد كان بمقدور الزراعة التقليدية أن تدعم الكثافات السكانية التي فاقت سائر مجتمعات الصيد والجمع إلا فيما ندر. وفي المراحل المبكرة من وجودها بدأت في إيجاد فائض من الطاقة أتاح في البداية لعدد صغير، لكنه مهم، من

الكبار فرصة الانخراط في طائفة متوسعة من النشاطات غير الزراعية أدت في نهاية المطاف إلى نشوء مجتمعات قبل صناعية متباينة وطبقية. ولم تختف حدود الإنتاج المفروضة على صنوف الزراعة التقليدية إلا بعد زيادة الاعتماد على الوقود الأحفوري، وهو دعم في مجال الطاقة أتاح تقليص القوة العاملة وأدى إلى ظهور المجتمعات المدنية الحديثة عالية الطاقة.

عموميات وخصوصيات

فرضت متطلبات زراعة المحاصيل نمطاً عاماً على سلسلة العمل في الحقل. فزراعة محاصيل متماثلة أدت إلى اختراع أو تبني ممارسات زراعية متشابهة إلى حد بعيد وذلك باستعمال أدوات وآلات بسيطة. وقد جاءت بعض هذه المخترعات في وقت مبكر، لكنها سرعان ما انتشرت وبقيت من دون تغيير لآلاف السنين. كما اقتصرت بعض المخترعات على مناطقها الأصلية لمدة طويلة من الزمن، لكنها ما لبثت أن تطورت بسرعة بمجرد انتشارها. ويدخل المنجل والمدرس اليدوي ضمن الفئة الأولى، أما محراث السكة[16] وآلة البذار فتدخل ضمن الفئة الثانية. جعلت الأدوات والآلات البسيطة عمليات الحقل أسهل (وبهذا قدمت ميزة ميكانيكية) وأسرع، كما ضاعفت الإنتاجية، ومكنت عدداً قليلاً من الناس من زراعة كميات كبيرة من الطعام، وصار من الممكن استثمار فائض الطاقة في البنى والأعمال: فمن دون المنجل والمحراث لما وجدت الكاتدرائيات - أو انطلقت رحلات الاستكشاف الأوروبية. سأقدم أولاً مسحاً مقتضباً لعمليات الحقل، والأدوات، والآلات البسيطة ثم أنتقل إلى وصف سيطرة الحبوب وخصوصيات الدورات الزراعية.

أعمال الحقل

يتطلب قسم كبير من الزراعة التقليدية عملاً مضنياً، لكن مثل هذه الفترات كان يتبعها فترات مطولة من نشاطات لا تتطلب عملاً شاقاً أو من فترات الراحة - وهذا نمط حياة مختلف عن نمط الترحال الثابت تقريباً عند مجتمعات الصيد والجمع. لقد ترك الانتقال من الصيد والجمع إلى الزراعة سجلاً مادياً واضحاً في عظامنا. فالفحوصات التي أجريت على بقايا الهياكل العظمية لنحو 2000 فرد في أوروبا عاشوا على مدى 33.000 عام من العصر الحجري الأعلى حتى القرن العشرين أظهرت تراجعاً في قوة انحناء عظام الساق مع انتقال السكان بصورة متزايدة إلى نمط حياة حضرية خالية من النشاط البدني (رف Ruff وآخرون 2015). هذه العملية اكتملت قبل ألفي عام، ولم يتبع ذلك أي تراجع آخر في قوة عظام الساق منذ ذلك الحين، ولو أن إنتاج الطعام أصبح آلياً أكثر، وهي ملحوظة تؤكد أن الانتقال من حياة الصيد والجمع إلى الزراعة، ومن الحركة إلى الخمول كان خطاً زمنياً فاصلاً حقيقياً في تاريخ تطور البشر.

تطلبت الضرورات البيئية توقيت عمل الحقل في الزراعة التقليدية، وهذا متطلب أكده كتاب الزراعة *De agri cultura* وهو أقدم مؤلف حول إرشادات الزراعة وضعه ماركوس كاتو Marcus Cato في القرن الثاني قبل الميلاد: «تأكد من أنك تؤدي كل عمل زراعي في وقته،

فهذه هي طريقة الزراعة: فإذا ما تأخرت عن أداء عمل ما، تأخرت عن أداء كل الأعمال». ظلت عملية البذار يدوية لآلاف السنين، أما سائر أعمال الحقل الأخرى فكانت بحاجة إلى أدوات كثرت وتنوعت بمرور الوقت. صحيح أن بعض تصاميم الآلات الزراعية عرفت منذ وقت طويل، لكن مثل هذه الآلات لم تنتشر إلا في الحقبة الحديثة المبكرة (1500-1800).

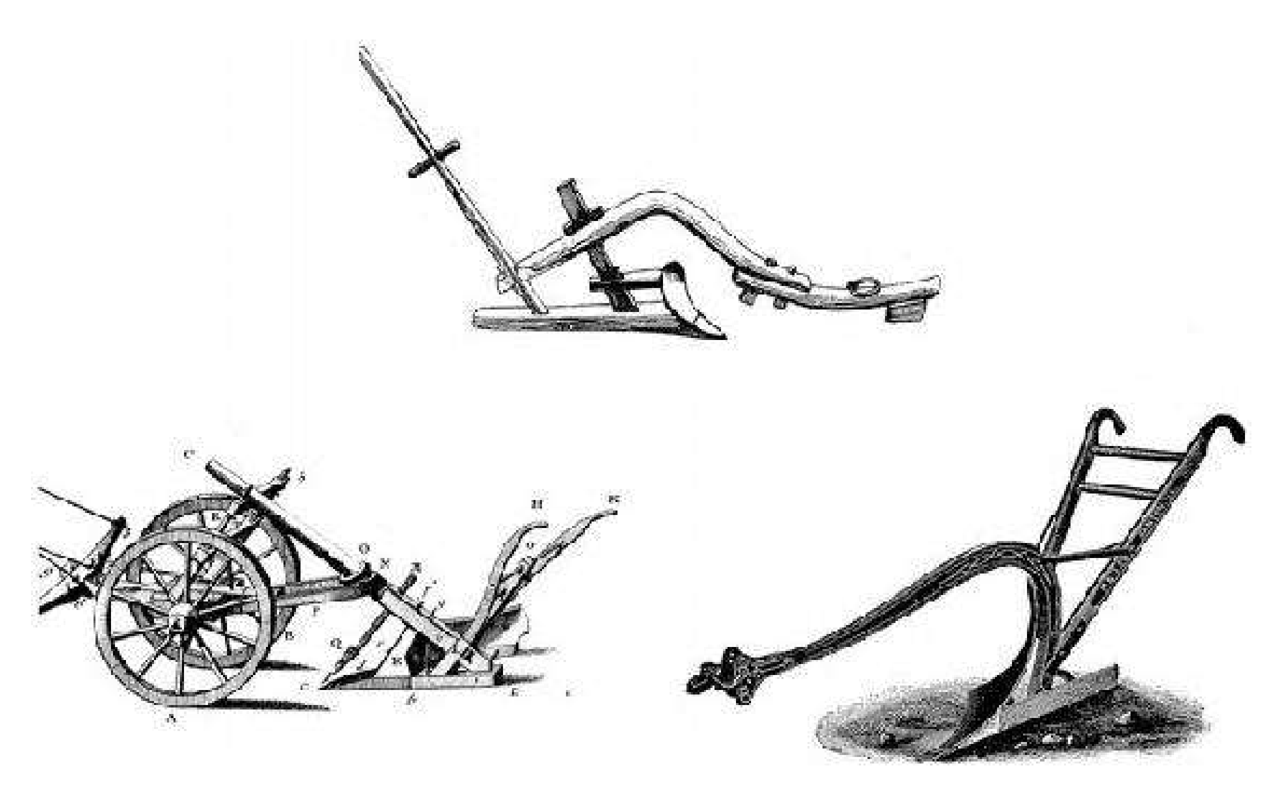
وهناك مراجعات لأدوات الزراعة التقليدية، والمعدات والآلات في كتب تاريخ الزراعة في مناطق أو بلدان محددة سنشير إليها لاحقاً في هذا الفصل، وهي مذكورة بالتفصيل في كتب متخصصة من تأليف وايت White أ(1967) للإمبراطورية الرومانية، وفسيل Fussell أ(1952) ومورغان Morgan أ(1984) لبريطانيا، وليرتش Lerche أ(1994) للدنمارك، وأردري Ardrey أ(1894) للولايات المتحدة، وبراي Bray أ(1984) للصين. لقد استخدمت كل هذه المصادر في وصف كل المعدات المهمة والممارسات والتطورات الزراعية الأساس في الصفحات التالية؛ لكنني لن أتحدث إلا عن أطقم الحيوانات في القسم المخصص لقوى الجر التقليدية.

بدأت السلسلة في كل ثقافات العالم القديم العالية بالحراثة. وكما وردت في رسالة صينية كلاسيكية «لم يكن في وسع أي ملك أو حاكم إقليم التخلي عنها». وتنعكس هذه الضرورة في الكتابات القديمة أيضاً. وهناك رسوم لمحاريث وردت في السجلات المسمارية السومرية والمصرية الهيروغليفية (ينسن Jensen أ1969). فالحراثة أفضل من العزق بكثير في إعداد الأرض للبذار: فهي تفتت التربة المتكتلة، وتقتلع الجذور، وتجعل الأرض طرية، جيدة التهوية تسهل إنتاش البذور ونموها. أما أول المحاريث البدائية التي استخدمت بوجه عام بعد 4000 قبل الميلاد في بلاد ما بين النهرين، فكانت مجرد عصي خشبية مدببة ذات مقبض. ثم زود معظمها برأس معدنية، لكنها بقيت متناظرة (تطرح التراب على كلا الجانبين) وخفيفة لبضعة قرون من الزمن. مثل هذه المحاريث البسيطة، التي اكتفت بشق ثلم قليل العمق للبذور وتركت الأعشاب المقطوعة على السطح، شكلت أساس الزراعة الرومانية واليونانية (aratrum باللاتينية). وقد استخدمت هذه المحاريث في الشرق الأوسط وأفريقيا وآسيا حتى القرن العشرين، حيث كان البشر يجرونها في الأماكن الفقيرة في ظروف بالغة القسوة. ولم يكن هذا الجهد أسرع من العزق إلا في حال كون التربة خفيفة ورملية (براي 1984). لذلك كانت إضافة السكة الحديدية الملتوية أهم أشكال التطور في المحراث. فسكة الحديد هذه تقلب التربة المحروثة إلى جانب واحد فقط (جزئياً أو كلياً)، وتدفن الأعشاب المقطوعة، وتنظف قعر خط الحراثة لعملية القلب التالية. وبفضل هذه السكة بات من الممكن حراثة الحقل مرة واحدة فقط بدلاً من حراثته حراثة متصالبة كما في العزق. لم تكن السكة أول الأمر سوى قطعة خشبية مستقيمة، لكن في القرن الأول قبل الميلاد بدأ الصينيون في عهد أسرة هان Han باستعمال صفائح معدنية ملتوية تشد إلى شفرة المحراث (الشكل 3-1).

أما المحاريث الأوروبية الثقيلة فكانت ذات سكة خشبية مزودة بقطعة حديدية تقطع حافة في التربة أمام شفرة المحراث. وفي النصف الثاني من القرن الثامن عشر كانت المحاريث الغربية لا تزال تحتفظ بعجلاتها الخشبية الثقيلة لكنها زودت بسكة حديدية ملتوية جيداً (الشكل 3-1). وشاع استعمال محاريث السكة هذه في أوروبا وأمريكا الشمالية مع توافر الفولاذ الرخيص الذي أنتج بعملية بسمر Bessemer في ستينيات القرن التاسع عشر وبكميات كبيرة فيما بعد في أفران

مفتوحة (سميل 2016) (الشكل 3-1). وفي معظم أنواع التربة تترك الحراثة كتلاً كبيرة نسبياً من التربة المتماسكة التي يجب تفتيتها قبل البذار. صحيح أن العزق يؤدي الغرض المطلوب، لكنه بطيء ومرهق. لذا استعملت أدوات التسوية في حراثات المحراث القديم كافة. ومرت مراحل تطورها من مجرد مسحاة بدائية إلى أنواع مختلفة من الهياكل الخشبية أو المعدنية تشد إليها أوتاد خشبية أو أسنان أو أقراص معدنية. وكثيراً ما استخدمت أدوات التسوية المقلوبة لزيادة نعومة سطح التربة.

بعد حراثة الأرض وتفتيتها وتسويتها تصبح معدة للبذار. ومع أن أدوات البذار كانت مستعملة في بلاد ما بين النهرين منذ عام 1300 قبل الميلاد، ومع أن الصينيين الهان استعملوا محاريث البذار، إلا أن البذار اليدوي بطريقة النثر - الذي



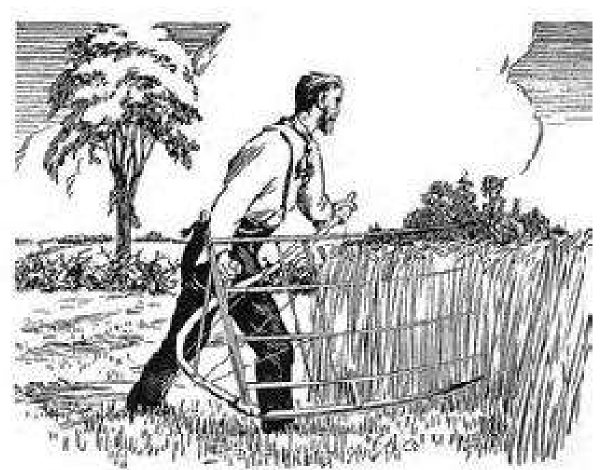
الشكل 3-1

تطور محاريث السكة الملتوية. كان للمحراث الصيني التقليدي (في الأعلى) سكة صغيرة ومنحنية انحناء ناعماً مصنوعة من حديد صب لا ينكسر. أما المحراث الأوروبي الثقيل من العصور الوسطى (في أسفل اليسار) فكانت له حديدة مدببة أمام الشفرة تقطع الجذور. وكانت السكة والشفرة في المحراث الأمريكي، الذي يعود تاريخه إلى منتصف القرن الثامن عشر (أسفل اليمين)، ملتحمتين مع قطعة فولاذية منحنية. المصادر: هوبفن Hopfen أ(1969)، ديدرو Diderot ودالمبير D'Alembert أ(1769-1772) وأردري (1894).

يسبب كثيراً من الهدر والتفاوت في الإنبات - ظل شائعاً حتى القرن التاسع عشر. في أواخر القرن السادس عشر ظهرت حفارات بسيطة تسقط البذور عبر أنبوب من سلة مثبتة بالمحراث وانتشرت بادئ الأمر في شمال إيطاليا. وبعد فترة وجيزة، ظهرت مخترعات كثيرة حولتها إلى آلات بذار معقدة. أما الزراعة المتداخلة فغالباً ما كانت تتم بطريقة العزق. كان روث الخيل والفضلات العضوية الأخرى تنقل إلى الحقول بالعربات، وفي صهاريج خشبية، أو في دلاء مدلاة من طرفي عارضة خشبية تُحمل على الكتفين، وهي ممارسة شائعة في شرق آسيا. بعدئذ كانت هذه الفضلات تنثر على الحقل بالمذراة، أو تغرف بالمغرفة، أو تُصب من الصهاريج.

كان المنجل أول الأدوات التي حلت محل الأحجار الحادة القصيرة التي استخدمتها كثير من مجتمعات الصيد والجمع. كما أن مناجل كبيرة ذات حواف قاطعة بطول 1.5 م موثقة من بلاد الغال الرومانية[17] (تريسمر Tresemer أ1996؛ فيرلي Fairlie أ2011). وللمناجل شفرات مسننة (التصاميم القديمة) أو صقيلة، وقد تكون شبه دائرية، أو مستقيمة، أو منحنية قليلاً. كان القطع بالمناجل بطيئاً، وكانت المناجل المزودة بالمهاد والمستعملة في حصاد القمح هي المفضلة لحصاد المساحات الواسعة (الشكل 3-2). لكن خسارة القمح التي يسببها الحصاد بالمنجل من جراء تكسير السنابل كانت أقل من تلك التي يسببها الحصاد بالمحش لاتساع مدى حركته. ظلت تلك الممارسة شائعة في آسيا لحصاد الأرز لسهولة تكسره. ولم تصل الحصادات الميكانيكية إلى حقول القمح في أوروبا وأمريكا إلا في أوائل القرن التاسع عشر (ألدريش Aldrich أ2002). كانت المحاصيل تنقل إلى البيوت على شكل رزم تحمل على الرأس، وفي سلال تتدلى من عارضة خشبية تحمل على الكتفين أو من طرفي الحيوان وفي عجلات اليد، والعربات، أو العربات الكبيرة التي يجرها أو يدفعها الناس أو الحيوانات.





الشكل 3-2

المنجل والمحش كما يظهر في الموسوعة الفرنسية (ديدرو ودالمبير 1769-1772). كان المحش البسيط (على اليمين) يستعمل في التعشيب، أما المحش المزود بالمهاد فكان يستعمل لحصاد القمح. تظهر في الصورة أيضاً أدوات الطرق (التسوية) ومشحذ للمحش، بالإضافة إلى مشط وعدد من المذاري. أما الصور السفلية فتبين حصاد القمح في أمريكا في القرن الثامن عشر وذلك باستخدام المنجل والمحش ذي المهاد.

استهلكت معالجة المحصول قدراً كبيراً من الطاقة. فالمحصول المفروش على أرض الدراسة يضرب بالعصي أو المدراس اليدوي، والرزم تضرب على شبكة حديدية أو تجر فوق أمشاط خاصة، والحيوانات تدوس القمح المفروش، أو تجر مزالج أو مداحل ثقيلة فوقه. وقبل تبني المراوح التي تعمل بذراع التدوير (الكرنك) كانت التذرية - وهي فصل التبن والشوائب عن القمح - تتم يدوياً باستعمال السلة والمنخل، وكانت هناك حاجة للجهد اليدوي لطحن القمح قبل استخدام الحيوانات والماء وطواحين الهواء لميكنة العملية. كان الزيت يستخرج من البذور بوساطة معاصر يدوية أو تدار بقوة الحيوان، وهذه حال العصير الحلو من قصب السكر.

سيطرة الحبوب

بالرغم من أن سائر الزراعات التقليدية أنتجت أنواع القمح، والزيت، والليف والأعلاف، فإن سلسلة أعمال الحقل الموصوفة تنطبق في أغلب الحالات على زراعة الحبوب. فبالإضافة إلى الحراثة، كانت سيطرة الحبوب في الزراعة السنوية بالتأكيد الميزة الأوضح في العالم القديم. فالمجتمعات في أمريكا الوسطى التي لم تعرف المحراث شاركت في هذه الميزة باعتمادها على الذرة الصفراء، فحتى الإنكا لم يكونوا سوى استثناء جزئي: في المناطق المرتفعة، وعلى سفوح الجبال زرع الإنكا أنواعاً كثيرة من البطاطا، لكنهم زرعوا الذرة الصفراء أيضاً في الأماكن المنخفضة، وقمح الكينوا في منطقة ألتوبلانو في جبال الأنديز (ماكيافيلو Machiavello أ1991). واعتمدت الزراعة على ما يعرف باسم تشاكي تاكالا Chaki Takalla، وهو محراث يعمل بالقدمين يتألف من عمود خشبي له نهاية معقوفة وحادة وعمود عرضاني يدفع بالقدم ليحفر خط الحراثة.

كثير من الحبوب الأخرى كانت لها أهمية محلية أو إقليمية، ومنها الكينوا الإنكي Incan quinoa الذي شاع مؤخراً في النظام الغذائي النباتي الغربي، لكن الأنواع الأساسية من الحبوب الرئيسة انتشرت تدرجياً في جميع أنحاء العالم من مناطقها الأصلية. فانتشر القمح من الشرق الأدنى، والأرز من جنوب شرق آسيا، والذرة الصفراء من أمريكا الوسطى، والدخن من الصين (فافيلوف Vavilov أ1951؛ هارلان Harlan أ1975؛ نزبيت Nesbitt وبرانس Prance أ2005؛ ميرفي Murphy أ2007). وترجع أهمية الحبوب إلى مجموعة من عمليات التكيف التطورية والضرورات الخاصة بالطاقة. فالمجتمعات الرعوية جمعت أنواعاً كثيرة من النباتات،

وتبعاً للنظام البيئي المستغل، فقد كانت الدرنات أو البذور توافر معظم الطاقة الغذائية. أما في مجتمعات الحضر فقد كان اختيار الدرنات كطعام رئيس محدوداً.

تعرف الدرنات الطازجة بمحتواها المائي العالي بحيث لا يمكن تخزينها في غياب تحكم فعال بدرجة الحرارة والرطوبة. وحتى لو تم التغلب على هذا التحدي فإن حجمها الضخم يتطلب مساحات تخزين كبيرة من أجل تغطية احتياجات المجتمعات المكتظة بالسكان في خطوط العرض الشمالية (أو في خطوط العرض العليا) في أشهر الشتاء. لكن مجتمعات الأنديز في المناطق المرتفعة حلت هذه المشكلة من خلال حفظ البطاطا على شكل شونيو chuño. وهذا الغذاء المجفف الذي ينتجه شعب الكيتشوا Quechua وأيمارا Aymara من خلال عملية متبادلة من التجميد، والهرس، والتجفيف، يمكن أن يحفظ لشهور بل حتى سنوات (ولف Woolfe أ1987). فالدرنات قليلة البروتين (عادة ما تكون النسبة خمس ما تحتويه الحبوب: بعض أنواع القمح الدرمي drum wheat تحتوي على ما يصل إلى 13% من البروتين، أما البطاطا البيضاء فلا تحوي أكثر من 2%)، في حين تحتوي البقوليات على ضعفي ما تحتويه الحبوب من البروتين (البازلاء نحو 20%، الفاصولياء والعدس ما بين 18% و26%) وفول الصويا الذي يحتوي على أكثر من ثلاثة أضعاف (35-38%، وقد تصل في بعض السلالات المحسنة إلى 40% من وزنها). لكن متوسط محاصيل البقوليات ليس سوى جزء يسير من محاصيل الحبوب الرئيسة: فمتوسط محاصيل الحبوب في الولايات المتحدة في عام 1969 كان 2.5 طن/هكتار و7.3 طن/هكتار عام 2013، مع محاصيل بقولية مشابهة تقدر بنحو 1.4 طن/هكتار و2.5 طن/هكتار (فاو 2015أ).

وهكذا نرى أن الاعتماد على الحبوب له ميزات واضحة خاصة بالطاقة. فأولويتها تنبع من الجمع بين وفرة المحصول والقيمة الغذائية العالية (عالية من حيث المواد الكربوهيدراتية المشبعة والغنية بكميات معتدلة من البروتينات)، وكثافة طاقة عالية نسبياً عند النضج (بصفة عامة خمسة أضعاف أعلى من الدرنات) ومحتوى رطوبة منخفض ملائم للتخزين طويل الأجل (فهي لا تفسد في مخزن جيد التهوية حين تحتوي الحبوب على أقل من 14.5% من الماء). إن سيادة نوع معين مسألة تعتمد إلى حد كبير على ظروف البيئة (وبالأخص طول فترة الحياة النباتية، وتوافر التربة الملائمة، وتوافر الماء المناسب) والنكهات المفضلة. أما من حيث إجمالي محتوى الطاقة، فإن كل الحبوب متشابهة إلى حد كبير والفوارق بين بذور مختلف الحبوب الناضجة هي في معظم الحالات أقل من 10% (المربع 3-1).

تشكل المواد الكربوهيدراتية، التي تتخذ على الأغلب هيئة سكريات (أو نشويات) سريعة الهضم، السواد الأعظم من طاقة الحبوب الغذائية. وقد أدى ازدياد نسبة النشويات في النظام الغذائي الآدمي إلى تحول غذائي كبير عند تدجين الحيوان الأول حيث زادت الطفرات الوراثية عملية هضم النشاء لدى الكلاب مقارنة بالنظام الغذائي اللاحم عند الذئاب، وهذه خطوة بالغة الأهمية في تدجين النوع (أكسلسن وآخرون Axelsson et al. أ2013). ولمحتويات الحبوب من البروتينات مجال أوسع يتراوح بين أقل من 10% للكثير من سلالات الأرز ويصل إلى 13% للقمح الصيفي القاسي وحتى 16% للكينوا. فللبروتينات كثافة طاقة تماثل تلك الموجودة في المواد الكربوهيدراتية (17 ميغا جول /كغ). لكن دورها الرئيس في غذاء الإنسان لا يكمن في كونها

مصدراً للطاقة، بل مصدراً لتسعة أحماض أمينية رئيسة، التي يعد هضمها أساسياً لبناء الأنسجة البشرية وترميمها (منظمة الصحة العالمية 2002). ولا نقدر على تركيب بروتينات الجسم من دون تناول هذه الأحماض الأمينية في الأغذية النباتية والحيوانية.

المربع 1.3

كثافة الطاقة ومحتوى الكربوهيدرات والبروتينات في الحبوب الرئيسة

الحبوب	محتوى الطاقة ميغا جول /كغ	الكربوهيدرات %	البروتينات %
القمح	13.9 -13.5	75 -70	13 -9
الأرز	15.0 -14.8	87 -76	8 -7
الذرة	14.8 -14.7	75 -73	10 -9
الشعير	14.2 -13.8	75 -73	11 -9
الدخن	13.9 -13.5	75 -72	10 -9
الجاودار	13.9 - 13.3	75 -72	11 -9

المصادر: الأرقام مأخوذة من وزارة الزراعة الأمريكية (2011)

والقيمة الغذائية (2015)

وتحتوي الأغذية الحيوانية كافة والفطريات بأنواعها على بروتينات كاملة (مع نسب ملائمة من جميع الأحماض الأمينية التسعة الأساسية)، لكن الحبوب الأربعة الرئيسة بأجمعها (القمح والأرز والذرة والدخن) والحبوب المهمة الأخرى (الشعير والشوفان والجاودار) ينقصها الليسين، في حين أن الدرن ومعظم البقوليات ينقصها الميثيونين والسيستين. ومن الممكن توفير البروتين، حتى مع أقسى النظم الغذائية، من خلال الجمع بين المواد الغذائية التي تنقصها أحماض أمينية بعينها. إن المجتمعات الزراعية التي تعتمد اعتماداً كبيراً على نظم غذائية نباتية تهيمن عليها الحبوب وجدت وبشكل مستقل (وواضح أن هذا حدث في غياب أي معرفة بيوكيميائية: لم تُكتشَف الأحماض الأمينية ودورها في الغذاء إلا في القرن التاسع عشر) حلاً بسيطاً لهذا النقص الأساس من خلال الجمع بين الحبوب والبقوليات في نظم غذائية مختلطة.

في الصين كان فول الصويا (أحد النباتات الغذائية المهمة القليلة ذات المحتوى البروتيني الكامل) والفاصولياء، والبازلاء، والفول السوداني من المكملات للدخن الشمالي والقمح والأرز الجنوبي. أما في الهند فقد أسهم البروتين من دال (وهي كلمة هندية عامة تشمل البقوليات بما فيها العدس، والبازلاء، والحمص) في إثراء الأنظمة الغذائية القائمة على القمح والأرز. وفي أوروبا نجد أن أشهر خلطات البقوليات والحبوب تعتمد على البازلاء والفاصولياء والقمح والشعير والشوفان والجاودار. وفي غرب أفريقيا يستهلك الفول السوداني واللوبياء مع الدخن. وفي العالم الجديد، فإن الذرة الصفراء والفصولياء لم تؤكلا معاً في العديد من الأطباق وحسب، بل كثيراً ما تزرعان معاً في أثلام متبادلة في الحقل ذاته.

وهذا يعني أنه حتى النظم الغذائية النباتية الصِّرف يمكن أن توافر قدراً ملائماً من البروتينات. وفي الوقت ذاته، نرى أن سائر المجتمعات التقليدية تقريباً كانت تقدر قيمة اللحوم. أما المجتمعات التي تحرم استهلاكها، فإنها مجتمعات تلجأ إلى تناول منتجات الألبان (الهند) أو الأسماك (اليابان) لكي تحصل على البروتين الحيواني الجيد. في القمح نوعان فريدان من البروتين، لا من ناحية القيمة الغذائية، بل بسبب خصائصهما الفيزيائية (اللزوجة والمرونة). فبروتينات الغلوتين أحادية الجزيء (غليادين) لزجة؛ لكن البروتينات متعددة الجزيئات (غلوتينين) مرنة. وحين تتحد مع الماء فإنها تشكل مادة معقدة من الغلوتين مرنة بحيث تجعل العجين يختمر، وقوية في الوقت ذاته بحيث تتيح الاحتفاظ بفقاعات ثاني أكسيد الكربون المتشكلة في أثناء عملية التخمر (فيرافيربيك Veraverbeke ودلكورDelcour أ2002).

ولولا بروتينات القمح هذه، لما كان بالإمكان الحصول على خبز مختمر، وهو الغذاء الرئيس في الحضارة الغربية. لم تكن الخميرة معضلة على الإطلاق: فمادة الساكروميسز سيريفيزي *Saccharomyces cerevisiae* (التي توجد في الطبيعة) موجودة في قشور العديد من الفواكه والتوت بأنواعه، وقد تم تدجين الكثير من الفصائل منها ما أدى إلى تغيرات في التعبيرات الجينية وتركيبة المستعمرة (كوثان وآخرون Kuthan et al.). وتجعل هيمنة الحبوب على النظم الغذائية التقليدية توازنات الطاقة في إنتاج القمح أهم مؤشر على الإنتاجية الزراعية. والمعلومات حول متطلبات العمل الزراعي وتكاليف الطاقة في هذا الخصوص متوافرة بشأن طائفة واسعة من أعمال المزارع والحقول كل على حدة (المربع 3-2).

لكن الاستغراق في التفاصيل ليس ضرورياً لحساب توازنات الطاقة بشكل تقريبي. فاستعمال معدل يمثل صافي تكاليف الطاقة في الزراعة التقليدية يفي بالغرض تماماً. إن الحاجة القياسية إلى الطاقة في النشاطات المعتدلة تبلغ 4.5 أضعاف معدل الاستقلاب الأساسي عند الرجال وخمسة أضعاف عند النساء أو 1 و1.35 ميغا جول/سا (منظمة الأغذية والزراعة 2004). ويعطي طرح الحاجات الوجودية الأساسية صافي تكاليف طاقة عمل قدرها 670 و940 كيلو جول / سا. وهذا المتوسط البسيط هو تقريباً 800 كيلو جول/ سا وسأستعمله بوصفه صافي كلفة طاقة الطعام لمتوسط ساعة عمل في الزراعة التقليدية. وبالمثل، يتم حساب إجمالي الإنتاج من الحبوب بضرب كتلة الحصاد بمعادلات طاقة مناسبة (عادة ما تكون 15 جيغا جول/طن للحبوب التي تحتوي على نسبة رطوبة أقل من 15% بحيث يكون من الممكن تخزينها).

تشير نسبة هذين القياسين إلى إجمالي عائدات الطاقة، وبالتالي إلى الإنتاجية، الخاصة بهذه الأعمال الزراعية الحيوية. وكان صافي عائدات الطاقة -بعد حسم متطلبات البذور والطحن وخسائر التخزين- أقل بكثير. فقد وجب على المزارعين أن ينحوا جانباً جزءاً من كل محصول لاستعماله في البذار في العام التالي. إن اجتماع المحصول القليل مع الهدر المرتفع في البذور جراء البذار اليدوي ربما يعني ضرورة وضع ثلث، بل نصف، محصول الحبوب في العصور الوسطى جانباً. ومع ازدياد المحصول انخفضت هذه الحصص تدريجياً إلى أقل من 15%. فبعض الحبوب تؤكل كاملة، لكن معظم الحبوب قبل إعداد الطعام الفعلي (الطهو أو الخبز) ينبغي طحنها

المربع 3-2

متطلبات العمل والطاقة في الزراعة التقليدية

المهمات	الناس/الحيوانات	ساعة بالهكتار	كلفة الطاقة
تذرية			متوسط - ثقيل
عامة	1/ ---	100 - 120	متوسط - ثقيل
تربة رطبة	1/ ---	150 - 180	ثقيل
الحراثة			متوسط - ثقيل

محراث خشبي	1 /1	50 - 30	ثقيل
محراث خشبي	2 /1	30 - 20	ثقيل
محراث فولاذي	2 /1	15 -10	متوسط
تسوية	2 /1	3-10	متوسط
البذار			خفيف - متوسط
	- /1	4 -2	متوسط
بذار يدوي			
آلات البذار	2 /1	4 -3	خفيف
تعشيب	- /1	300 -150	متوسط - ثقيل
الحصاد			متوسط - ثقيل
منجل (قمح)	- /1	55 -30	ثقيل
منجل (أرز)	- /1	110 -90	ثقيل
مهاد	- /1	25 -8	ثقيل

حزم الرزم	1/-	8-12	متوسط - ثقيل
تكديس	1/ -	2- 3	ثقيل
الحصّاد	1/ 2	1- 3	متوسط
الحزّام	1/ 3	1- 2	متوسط
الجمع	4/ 20	2	متوسط
دراسة			خفيف - ثقيل
دراسة	1/ 4	10- 30	خفيف
دراسة يدوية	1/ -	30- 100	ثقيل
درّاسون	7/ 8	6- 8	ثقيل

ملحوظات: العمل الخفيف يستهلك أقل من 20 كيلو جول من طاقة الطعام بالدقيقة بالنسبة لرجل بالغ. العمل المتوسط هو الذي يصل فيه الجهد إلى 30 كيلو جول/د، أما العمل الثقيل فيتطلب جهداً يصل إلى 40 كيلو جول/ د. في حين أن المعدلات الخاصة بالنساء تقل بنسبة 30%.

المصادر: هذه المعدلات جمعت وأحصيت من معلومات وردت في بايلي Bailey أ(1908)، روجن Rogin أ(1931)، بك Buck أ(1937)، شن Shen أ(1951)، إزماي Esmay وهول Hall أ(1968). أما مؤشرات كلفة الطاقة فأخذت تقديراتها من دراسات خاصة بالاستقلاب تمت مراجعتها في دورنين Durnin وباسمور Passmore أ(1967).

المربع 3-3

طحن الحبوب

يحتوي دقيق القمح الكامل على اللب الكامل، أما الدقيق الأبيض فلا يحتوي إلا على سويداء الحبة (نحو 83% من الوزن الكلي) حيث تشكل النخالة (نحو 14%) والرشيم (نحو 2.5%) وهي الأجزاء التي تفصل للاستعمالات الأخرى (مجلس أطعمة القمح 2015). أما إنتاج الأرز الأبيض فيتطلب خسارة أكبر. فطبقة القشرة تشكل 20% من حبة الأرز؛ كما أن نزعها ينتج الأرز البني. وتشكل طبقة النخالة 8-10% من الحبة، كما أن إزالتها بدرجات متفاوتة تنتج الأرز الصقيل (الأبيض) الذي يحتوي على 70-72% من وزن الحبة الأصلي (IRRI أ2015).

وجاء في شهادات يابانية تتحدث عن نقص الطعام أن الناس اضطروا إلى أكل الأرز البني، وحين ساءت الأحوال مزجوه بالشعير، وأخيراً اضطروا إلى أكل الشعير وحسب (سميل وكوباياشي Kobayashi أ2011). وعند طحن الذرة الصفراء ينزع الغطاء العلوي، والغطاء البني، والرشيم وهذا يترك السويداء وحسب التي تشكل نحو 83% من الحبة. أما دقيق الذرة الصفراء المستعمل في صنع التورتيلا والطامال والماسا هارينا *masa harina* فينتج من طحن الحبوب الرطبة بعد نقعها في محلول الليمون (سيرا- مارسيا وآخرون 2010؛ Sierra-Marcia et al)، فيست Feast وفريز Phrase أ2015). وهذا يفصل القشرة عن الحبة ويطريها من خلال إذابة السيللوز والإقلال من وجود الميكوتوكسين ويعزز وجود النياسين (فيتامين ب 3).

أولاً، وفي هذه العملية تتم خسارة جزء من إجمالي كمية الحبوب (المربع 3-3).

إن الخسائر الناجمة عن سوء التخزين في المزارع التقليدية، وعن الإصابة بالحشرات وانتشار القوارض القادرة على الوصول إلى السلال والجرار تقلل إجمالي الحبوب المصلحة للأكل بنسبة قد تصل إلى عشرة بالمائة. وكما سبق وأشرنا، فإن الحبوب التي لا تتجاوز نسبة الرطوبة فيها 15% يمكن تخزينها لمدة طويلة؛ لكن الرطوبة الأعلى، لاسيما حين تجتمع معها الحرارة العالية، توافر شروطاً كاملة لإنتاش البذور ونمو الحشرات والفطريات. وبالإضافة إلى ذلك فإن الحبوب المخزونة خزناً سيئاً يمكن أن تلتهمها القوارض. وحتى في القرن الثامن عشر قللت متطلبات البذار وخسائر التخزين إجمالي كسب الطاقة في الحبوب الأوروبية بنحو 25%.

الدورات الزراعية

طغت عموميات الدورات الزراعية السنوية وسيطرة زراعة الحبوب على صنوف مذهلة من الخصوصيات المحلية والإقليمية. فقد كان لبعضها أصول ثقافية متميزة، لكنها متطورة إلى أبعد الحدود بوصفها استجابات وتعديلات لأنواع بيئية مختلفة. وما يلفت النظر أن الشروط البيئية كانت تحدد اختيار المحاصيل الرائدة، وبالتالي تركيب النظم الغذائية الأنموذجية، كما شكلت إيقاع الدورات الزراعية السنوية التي رسمت معالم إدارة العمل الزراعي. استطاع القمح الانتشار من الشرق الأوسط إلى سائر القارات لأنه ينمو بنجاح في كل الظروف المناخية. (في أشباه الصحارى وفي مناطق الأمطار المعتدلة وهو السلالة الغذائية الرائدة في المناطق المعتدلة بين 30 و60 درجة شمالاً) وارتفاعات (من مستوى سطح البحر إلى 3000 م فوق سطح البحر) وفي الكثير من أنواع التربة ما دام فيها صرف جيد (هين Heyne أ1987؛ شارما Sharma أ2012).

وعلى نقيض القمح، نجد أن الأرز نبات شبه مائي من المناطق الاستوائية المنخفضة، وينمو في حقول تغمر بالماء إلى ما قبل الحصاد (سميث وأنيلكومار Anilkumar أ2012). وقد امتدت زراعته إلى ما بعد منطقته الأصلية في جنوب شرق آسيا، لكن أفضل المحاصيل كانت على الدوام في المناطق الاستوائية وشبه الاستوائية الماطرة (ماك Mak أ2010). إن بناء حقول رطبة ذات حواف، وإنتاش البذور في الحواضن، ونقل البادرات، وتوفير عمليات ري إضافية تشكل بمجموعها متطلبات أعلى بكثير من متطلبات زراعة القمح. وعلى العكس من القمح، فإن الذرة الصفراء تعطي أفضل المحاصيل في المناطق التي تتمتع بفصول زراعية دافئة ماطرة، لكنه أيضاً تفضل التربة جيدة الصرف (سبراغ Sprague وددلي Dudley أ1988). أما البطاطا فتنمو حيث يكون الصيف معتدلاً والأمطار وفيرة.

كانت الدورات الزراعية السنوية محكومة بتوافر المياه في الأماكن الجافة وشبه الاستوائية في أقاليم الأمطار الموسمية، وبطول مواسم النمو في المناخ المعتدل. ففي مصر كان فيضان النيل يحدد الدورة السنوية للزراعة حتى تبني طريقة الري الدائم على نطاق واسع في النصف الثاني من القرن التاسع عشر. وكانت عملية البذار تبدأ مع انحسار مياه الفيضان (عادة في شهر نوفمبر) ولم يكن بالإمكان القيام بأي عمل في الحقل بين نهاية يونيو، حين تبدأ المياه في الارتفاع، ونهاية أكتوبر، حين تنحسر بسرعة، حين يكون المحصول جاهزا للحصاد بعد 150-185 يوماً (حسن Hassan أ1984؛ يانك Janick أ2002). وقد بقي هذا النمط سائداً من دون تغيير حتى القرن التاسع عشر.

في آسيا حيث تهطل الأمطار الموسمية، كان من الضروري أن تعتمد زراعة الأرز على الأمطار الصيفية، التي عادة ما تكون غزيرة لكنها متأخرة. ففي الزراعة الصينية التكثيفية على سبيل المثال، كانت بواكير بادرات الأرز تنقل من الحواضن إلى الحقول في أبريل. وكان الحصاد الأول في يوليو تتبعه على الفور زراعة الأرز المتأخر الذي يحصد في أواخر الخريف، ويتبعه بدوره محصول شتوي. أما الزراعة المزدوجة في المناطق المعتدلة فكانت تتم تحت ضغط أقل. ففي أوروبا الغربية كانت المحاصيل الشتوية التي تزرع في الخريف تحصد بعد خمسة إلى سبعة أشهر، تتبعها محاصيل تبذر في الربيع وتنضج في غضون أربعة إلى خمسة أشهر. أما في المناطق الشمالية الباردة، فإن الأرض تبدأ بالذوبان بحلول أبريل، لكن زراعة محصول سنوي

واحد يجب أن ينتظر حتى أواخر مايو، حيث يتراجع خطر الصقيع القاتل ويكون أمام المحصول ثلاثة أشهر حتى ينضج قبل عودته.

يفرض إيقاع الزراعة الذي يخضع لعوامل المناخ احتياجات متذبذبة على تعبئة الطاقة الآدمية والحيوانية وإدارتها. فالمناطق ذات المحصول السنوي الواحد تكون قد مرت بسكون أشهر الشتاء الطويلة، وهذا ما يميز زراعة القمح في أوروبا الشمالية وسهول أمريكا الشمالية. فالعناية بالحيوانات الأليفة مهمة تستمر بالطبع طوال السنة، لكنها تترك مجالاً أيضاً لأداء الأعمال الحرفية المنزلية، وإصلاح معدات الزراعة أو البناء. كان الكثير من أيام الشتاء القصيرة في شمال الصين يخصص لصيانة نظم الري وتوسعتها.

كانت الحراثة والبذار في فصل الربيع تحتاج إلى بضعة أسابيع من العمل المضني، تتبعها بضعة أشهر من الروتين اليسير (مع أن تعشيب حقول الأرز يتطلب جهداً شاقاً). لكن الحصاد كان أصعب الأوقات، كما كانت الحراثة في الخريف تمتد إلى فترة أطول من المعتاد بكثير. وإذا سمحت الظروف المناخية الأقل قساوة بزراعة محصول شتوي - في غرب أوروبا، وفي سهل الصين الشمالي، وفي معظم المناطق الشرقية من أمريكا الشمالية - كان هناك شهران أوثلاثة أشهر بين حصاد موسم الصيف والاستعداد لموسم الشتاء. وفي المقابل، في البلدان ذات الأمطار المتفاوتة، وبخاصة في آسيا حيث الأمطار موسمية، لم يكن هناك سوى ثغرات محدودة لأداء أعمال الحقل. فعامل الوقت في الزراعة والحصاد كان أمراً بالغ الأهمية بوجه خاص. وحتى أسبوع واحد من التأخير عن فترة الزراعة المثالية قد يسبب تراجعاً كبيراً في الغلال. فحصاد القمح في وقت مبكر قد يحتاج إلى كثير من الجهد لتجفيفه من رطوبته العالية، كما أن تأخيره قد يسبب خسائر بسبب تكسر السنابل الناضجة زيادة عن الحد.

قبل إدخال الحصادات والحزامات كان الحصاد اليدوي يستغرق وقتاً طويلاً يصل إلى أربعة أضعاف زمن الحراثة، ووضع حدوداً واضحة على أكبر مساحة تستطيع أسرة واحدة التعامل معها. فإذا تطلب الأمر الإسراع في حصاد محصول معين تمهيداً لزراعة المحصول التالي زاد الطلب على العمالة زيادة كبيرة. ويحكي مثل صيني قديم هذه الحاجة قائلاً: «حين يصفرّ وينضج القمح والدخن معاً، ينبغي على الكل، حتى الفتيات اللائي يشتغلن بالغزل، الخروج لمد يد العون». وقد تحدث بَكْ (1937) عن هذه الحاجة في دراساته الشاملة للزراعة التقليدية في الصين فقال: إن الزراعة والحصاد (بين مارس وسبتمبر) في مناطق الزراعة المزدوجة في الصين تستخدم كل العمالة المتوافرة تقريباً (94-98% في المتوسط). أما في أجزاء من الهند فنرى أن الذروة في شهري الصيف تتطلب أكثر من 110% بل 120% من العمالة المتوافرة فعلياً، ونلاحظ حالة مماثلة في أجزاء أخرى من آسيا حيث تهطل الأمطار الموسمية (كلارك Clark وهازويل Haswell أ1970). ولا يمكن التغلب على أزمة الطاقة الشائعة هذه إلا إذا بذلت الأسر بأكملها جهداً مضنياً لفترات طويلة من الزمن - أو اعتمدت على العمالة المهاجرة.

لم يكن استخدام الطاقة الحيوانية الذي تدخره كثير من الزراعات لأصعب أعمال الحقل متساوياً. فعلى سبيل المثال، كانت أطول فترات العمل لجواميس الماء في جنوب الصين شهرين للزراعة وتسوية التربة وتفتيتها في أوائل الربيع، وستة أسابيع للحصاد الصيفي، وشهر واحد لتهيئة الحقل

(مرة أخرى للحراثة والتسوية) استعداداً لمحصول الشتاء. كل هذا يستغرق 130 - 140 يوماً أو أقل من 40% من السنة (كوكريل Cockrill أ1974). أما في النظم أحادية المحصول ،كما في شمال أوروبا، فكانت الخيل تؤدي الأعمال الشاقة في حراثة الحقل مدة 60-80 يوماً في الخريف والربيع والحصاد الصيفي، لكن معظمها كان يستخدم في النقل. ويتراوح يوم العمل العادي من خمس ساعات للثيران في كثير من المناطق الأفريقية إلى أكثر من عشر ساعات لجواميس الماء في حقول الأرز في آسيا والخيل في فصول الحصاد في أوروبا وأمريكا الشمالية.

طرائق التكثيف

لا يمكن لأي سعي لتحسين المحصول أن ينجح إلا إذا حقق تقدماً في ثلاثة أمور أساسية: أولاً إحلال الطاقة الحيوانية محل الآدمية. ففي زراعة الأرز نجد أن هذا لم يلغ عادة إلا أصعب الأعمال الآدمية المضنية مثلما حدث حين حلت الحراثة العميقة باستخدام جواميس الماء محل عزق التربة. أما في زراعة الأراضي الجافة فحلت الطاقة الحيوانية محل الآدمية، وزادت سرعة الكثير من أعمال الحقول والمزارع، ومنحت الناس فرصة مزاولة نشاطات منتجة أخرى أو فرصة تقليص ساعات العمل. هذا الانتقال بفضل المحرك الأول لم يسرّع العمل ويسهله وحسب، بل حسن نوعيته، سواء من حيث الحراثة، أو البذار، أو الدراسة. ثانياً، الري والتسميد خففا، إن لم نقل أزالا تماماً، من وقع القيدين الرئيسين على إنتاجية المحصول وهما شح المياه وقلة الأسمدة. ثالثاً، إن كثرة أنواع المحاصيل زادت الزراعة التقليدية مرونة وإنتاجية إما من خلال تعدد المحاصيل أو الدورات الزراعية.

عند الفلاحين الصينيين مَثلان يجسدان أهمية نزع هذين القيدين وتنويع الإنتاج: «إن نجاح المحصول أو فشله يعتمد على الماء؛ أما وفرته فتعتمد على السماد»، و«زراعة الدخن في أعقاب الدخن تجعلك تبكي». شكل استعمال حيوانات الجر تقدماً أساسياً في مجال الطاقة لم تقتصر نتائجه على الزراعة والحصاد إذ لم يعد بالإمكان الاستغناء عن الحيوانات في التسميد، بوصفها مصدراً للمواد المغذية الكامنة في الروث، ومحركاً ينثرها على المحاصيل. وقد زادت فعالية الري في كثير من المناطق. فالمزيد من وسائط التحريك الأولية القوية مع توافر المياه والأسمدة زادت من تنوع المحاصيل والدورات الزراعية. واستطاعت هذه التطورات بدورها أن تدعم أعداداً وفيرة من الحيوانات الأقوى نظراً لاتصال طرائق التكثيف الثلاثة بدورات تعزيز متبادلة.

حيوانات الجر

تمخض تدجين الحيوانات عن كثير من السلالات المخصصة للعمل والتي تتمتع بصفات مميزة، حيث تتراوح أوزانها بين 1.00 كغ ونيف للحمير الصغيرة و1.000 كغ لأثقل أحصنة الجر. أما الثيران الهندية فوزنها لا يتجاوز 400 كغ؛ وأبقار الرومانيولا الإيطالية أو أبقار الشيانينا فيبلغ وزنها ضعفي وزن الثيران الهندية (بارتوزيفيتش وآخرون Bartosiewicz et al.؛ لينسترا

Lenstra وبرادلي Bradley أ1999). كانت معظم خيل أوروبا وآسيا مجرد أمهر لا يتجاوز ارتفاعها 14 كفاً ووزنها وزنَ ثور آسيوي. والكف مقياس إنجليزي تقليدي يساوي أربع بوصات (أي 10.16 سم). وكان ارتفاع الحيوان يقاس من الأرض إلى الحارِك - أعلى الكاهل، أي ظهر الحيوان بين شفرتي الكتفين أسفل العنق والرأس. في حين أن ارتفاع الخيل الرومانية كان 11-13 كفاً. أما أثقل السلالات الأوروبية في الحقبة الحديثة - مثل الباربنسون البلجيكي، والبولوني والبيرشورون الفرنسي، والكلايدزدايل الإسكتلندي، والسفوك والشاير الإنجليزي، والراينلاندر الألماني، وحيوانات الجر الروسية - فكانت تناهز 17 كفاً أو تزيد عليها. أما وزنها فيبلغ 1.000 كغ أو أكثر بقليل (سيلفر Silver أ1976؛ جامعة أوكلاهوما الحكومية 2015). كما يتراوح وزن جاموس الماء بين 250 كغ و700 كغ (كوكريل 1974؛ بورغيز Borghese أ2005).

استعملت المجتمعات الزراعية التقليدية الحيوانات في القيام بمختلف أعمال الحقول والمزارع، لكن الحراثة كانت النشاط الذي أحدثت فيه أكبر الفوارق (ليسير Leser أ1931). وبصفة عامة، فإن قوة الجر عند حيوانات العمل تتناسب وأوزانها، لكن العوامل الأخرى التي تحدد أداءها الفعلي تتضمن جنس الحيوان، وعمره، وحالته الصحية، وخبرته، وكفاءة العنان، وحالة التربة والأرض. وبما أن هذه العوامل قد تتباين إلى حد كبير فإن من المفضل تلخيص القوة المفيدة للأنواع العاملة المعروفة من حيث المجالات الأنموذجية (هوفن Hopfen أ1969؛ كوكريل 1974؛ غو Goe وداول Dowell أ1980). إن الجر الأنموذجي يساوي 15% من وزن الجسم أما بالنسبة إلى الحصان فيصل إلى 35% عند بذل جهد لمدة قصيرة (نحو 2 ك واط) وأكثر من ذلك لبضع ثوان من جهد كبير (كولينز Collins وكاي Caine أ1926). إن اجتماع الكتلة الكبيرة مع السرعة العالية نسبياً تجعل الحصان أفضل حيوانات الجر، لكن معظم الأحصنة لا تستطيع العمل بانتظام بمعدل حصان بخاري واحد (745 واط) وتعطي عادة بين 500 و850 واط (المربع 3-4، الشكل 3-3).

وتفاوتت متطلبات الجر تفاوتاً كبيراً تبعاً لطبيعة العمل (الحالات المتطرفة من العمل الثقيل والخفيف يمكن أن تكون الحراثة العميقة والتسوية) وتبعاً لنوع التربة (صعبة في حالة التربة الطينية، وسهلة في التربة الرملية). أما الحراثة السطيحة (بشفرة حراثة واحدة) وإزالة الأعشاب فتحتاج إلى جر بقوة 80-120 كغ، في حين أن الحراثة العميقة تتطلب جراً بقوة 120-170 كغ، كما تحتاج حصادة القمح الحزامة الميكانيكية إلى 200 كغ من الجر. حتى زوج من الأحصنة يمكنه القيام بكل هذه الأعمال، لكن زوجاً من الثيران كان غير ملائم للحراثة العميقة أو الحصاد بالحصادة. وفي الوقت عينه، كانت الضرورات الميكانيكية تحبذ الحيوانات صغيرة الحجم: فمع تساوي الأشياء الأخرى، كانت خطوط الجر متوازية أكثر مع اتجاه الجر ما يؤدي إلى مزيد من الكفاءة، وفي الحراثة، فإن خط جر أخفض يخفف من الضغط نحو الأعلى على المحراث ما يسهل عملية توجيهه على الحراث. كما أن الحيوانات صغيرة الحجم رشيقة الحركة، وربما تعوض خفة وزنها بشدة عزمها وقوة تحملها.

ولا يمكن ترجمة طاقة الجر الكامنة إلى أداء فعال إلا إذا توافر طقم الفرس العملي (لوفيفر دي نويتس 1924 Lefebvre des Noëttes؛ هودريكور Haudricourt ودولامار

Delamarre أ1955؛ نيدام Needham أ1965؛ سبرويت Spruytte أ1983؛ ويلر Weller أ1999؛ جانز Gans أ2004). وينبغي تحويل الجر إلى نقطة العمل -سواء أكانت شفرة المحراث أو حافة الحصادة- وذلك من خلال ترس مسنن يسمح بنقلها بكفاءة وبالتحكم الآدمي بحركات الحيوان. قد تبدو هذه التصاميم بسيطة اليوم، لكن ظهورها استغرق أمداً طويلاً. كانت الأبقار، وهي أول الحيوانات العاملة، تشد بوساطة النير، وهو عارضة خشبية مستقيمة أو منحنية تربط بقرني الحيوان أو عنقه.

كان أقدم أنواع النير في بلاد ما بين النهرين (يفضل استعماله مع الحيوانات القوية قصيرة العنق، والذي أضحى شائعاً فما بعد في إسبانيا وأمريكا اللاتينية) هو النير مزدوج الرأس، والمثبت إما في الجزء الأمامي أو الخلفي من الرأس (الشكل 3-4). كان ذلك النير البدائي: مجرد عارضة خشبية يمكن لأربطة الرقبة الخاصة بها أن تخنق الحيوان عند أدائه عملاً شاقاً، وفيها زاوية الجر عريضة أكثر من اللزوم. ولتجنب الازدياد في الضغط على عنق الثور أو البقرة، ينبغي أن يكون الحيوانان بارتفاع واحد، ومن الواجب ربط زوجين من الحيوانات حتى لو كان واحد فقط كافياً لأداء العمل الخفيف. وقد استخدم نير برأس واحد مريح للحيوان في أجزاء متعددة من أوروبا (شرقي البلطيق، وجنوب ألمانيا). أما النير وحيد العنق والمتصل بالوصلتين (عارضتين خشبيتين) أو بالإرياح (حبلي الجر) والكابوسة (المقبض الأفقي) فكان منتشراً في شرق آسيا ووسط أوروبا (الشكل 3-4). لكن أفريقيا والشرق الأوسط وجنوب آسيا كانت تفضل العنق المزدوج.

تعد الخيل أقوى حيوانات الجر. فعلى عكس البقر، الذي تنقسم كتلة أجساده إلى قسمين متساويين أمامي وخلفي، نرى أن الجزء الأمامي من الحصان أكبر من الجزء الخلفي (بنسبة 3:2) لذلك يستطيع الحيوان الذي يجر المحراث الاستفادة من الحركة

المربع 3-4

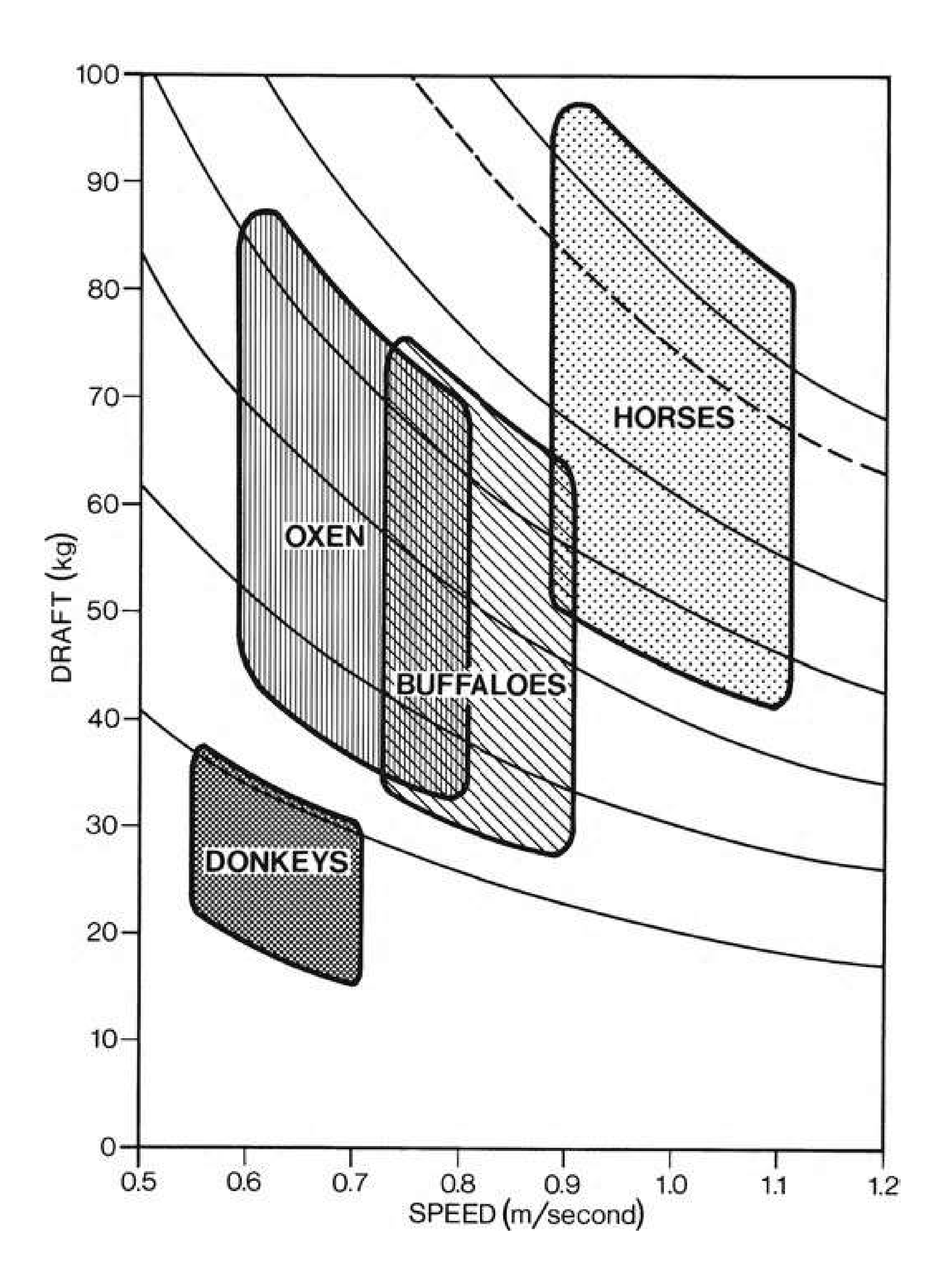
الأوزان وعزم الجر وسرعات العمل وقوى الحيوانات الأليفة

الحيوان	الأوزان (كغ) المدى المعتاد	الأحجام الضخمة	الجر الأنموذجي (كغ)	السرعة المعتادة (م/ثا)	القوة (واط)
أحصنة	350- 700	800- 1000	50- 80	0.9- 1.1	500- 850

بغال	500 -350	600 -500	60 -50	1.0 -0.9	600 -500
ثيران	700 -350	950 -800	70 -40	0.8 -0.6	550 -250
بقر	400 -200	600 -500	40 -20	0.7 -0.6	300 -100
جواميس	600 -300	700 -600	60 -30	0.9 -0.8	550 -250
حمير	300 -200	350 -300	30 -15	0.7 -0.6	200 -100

ملحوظة: قيم القوى مقربة إلى أقرب 50 واط.

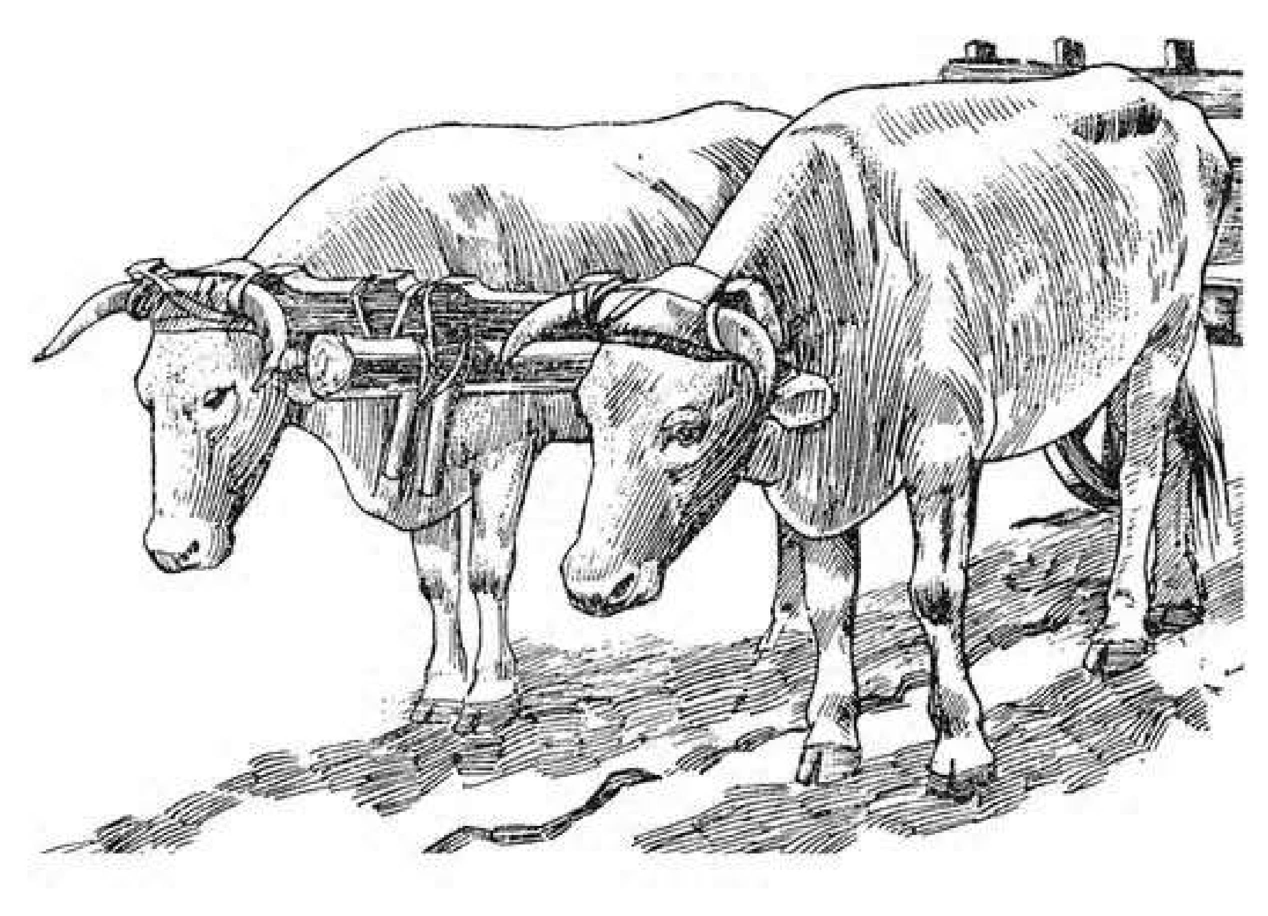
المصادر: مبنية على هوبفن (1969) راوز Rouse أ(1970)، كوكريل (1974) وغو وداول (1980).

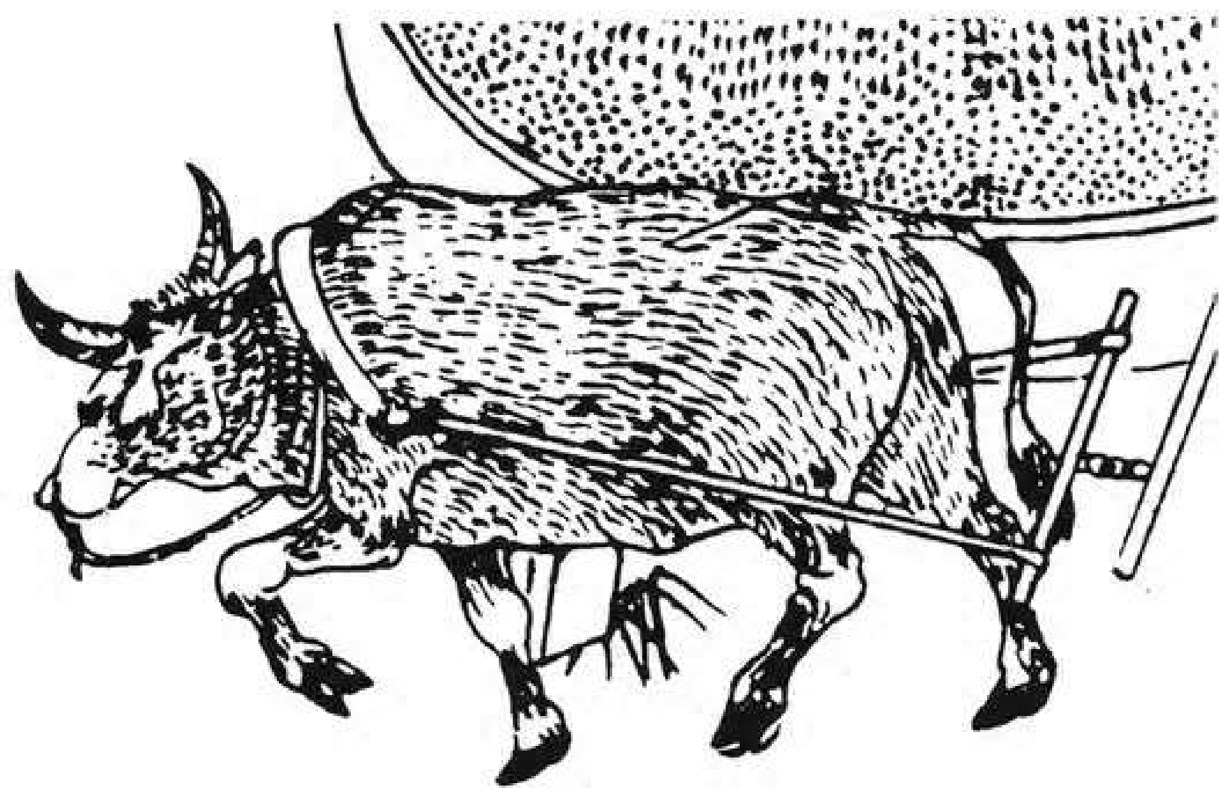

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
DRAFT (kg)
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
SPEED (m/second)
HORSES
OXEN
BUFFALOES
DONKEYS

الشكل 3-3

تبين مقارنة قوى الجر لدى الحيوانات بوضوح تفوق الحصان. مقتبسة من معلومات وردت في هوفن (1960)، راوز (1970) وكوكريل (1974).

العطالية أكثر من البقر (سمايذ Smythe أ1976). وفيما عدا التربة الرطبة والثقيلة، تستطيع الأحصنة العمل في الحقول عملاً ثابتاً بسرعة 1 م/ثا، أي إنها أسرع من الثيران بنحو 30-50%. فطاقة الجر القصوى لمدة ساعتين لزوجين من الأحصنة الثقيلة ربما تزيد مرتين على طاقة أفضل أزواج البقر. وتستطيع أضخم الأحصنة العمل على





الشكل 3-4

كان نير الرأس أول عنان غير كفء للثور العامل. ثم أصبح نير العنق الطريقة السائدة لتطقيم (تكدين) الحيوان في سائر أنحاء العالم. مقتبسة من هوفن (1963) ومن رسوم لدى أسرة مينغ المتأخرة (1637).

فترات متقطعة بمعدل 2 ك واط، أو أكثر من ثلاثة أحصنة بخارية قياسية. لكن البقر السنامي يتفوق في المناطق الاستوائية بفضل تنظيم حرارة أجساده؛ كما أنه أقل عرضة للإصابة بالقراد. والجواميس المائية تحب المناطق الاستوائية الرطبة وتهضم العلف الخشن أكثر من البقر وتستطيع أكل النباتات المائية وهي مغمورة بالماء.

ويلاحظ أن الأحصنة في أقدم صورها الموجودة لا تظهر وهي تكدح في الحقول، بل تظهر وهي تجر عربات احتفالية خفيفة أو عربات هجومية. وفي معظم التاريخ القديم كانت أحصنة الجر تطقم بنير ظهري (ويلر 1999) وهو جهاز ذو شُعبتين من الخشب أو المعدن يوضع على الحيوان مباشرة وراء الحارك ويثبت في مكانه بوساطة سير جلدي يمر فوق صدر الحيوان ويثبت بطرفي النير بوساطة سير جلدي يمر فوق الظهر وأسفل البطن. لقد أدت الطريقة غير الدقيقة التي أعاد بها لوفيفر دي نوت بناء طقم الحصان الروماني إلى نتيجة خاطئة، مع أنها ظلت مقبولة لعشرات السنين على نطاق واسع، بأن هذا كان ترتيباً فاشلاً لأنه يخنق الحيوان على اعتبار أن طوق الصدر يميل نحو التراكب ride up (المربع 3-5).

كانت نقطة الجر في النير الصدري الذي ظهر في الصين في بدايات عهد أسرة هان الحاكمة بعيدة جداً عن أقوى عضلات الحيوان الصدرية (الشكل 3-5). ومع ذلك انتشر التصميم عبر أوراسيا حتى وصل إلى إيطاليا في القرن الخامس، على الأغلب مع المهاجرين الأستروغوث، كما وصل إلى شمال أوروبا بعدها بثلاثمائة عام. لكن تحويل الأحصنة إلى حيوانات عمل عالية الشأن كان بحاجة إلى اختراع صيني آخر. فقد استعمل نير العنق في الصين أولاً منذ القرن الأول قبل الميلاد كوسيلة دعم ناعمة للنير الصلب؛ ولم يتحول إلى قطعة واحدة إلا بالتدريج. وبحلول القرن الخامس الميلادي صارت جداريات دونغ هوانغ تبين شكله الآخر. ويشير الدليل التاريخي إلى وصوله إلى أوروبا في القرن التاسع حيث دخل الخدمة العامة في غضون قرون ثلاثة، وبقي التصميم من دون تغيير كبير حتى حلت الآلات محل الأحصنة بعد ذلك بنحو 700 عام. وما زال مستعملاً بأعداد متناقصة في عدد من أحصنة العمل في الصين.

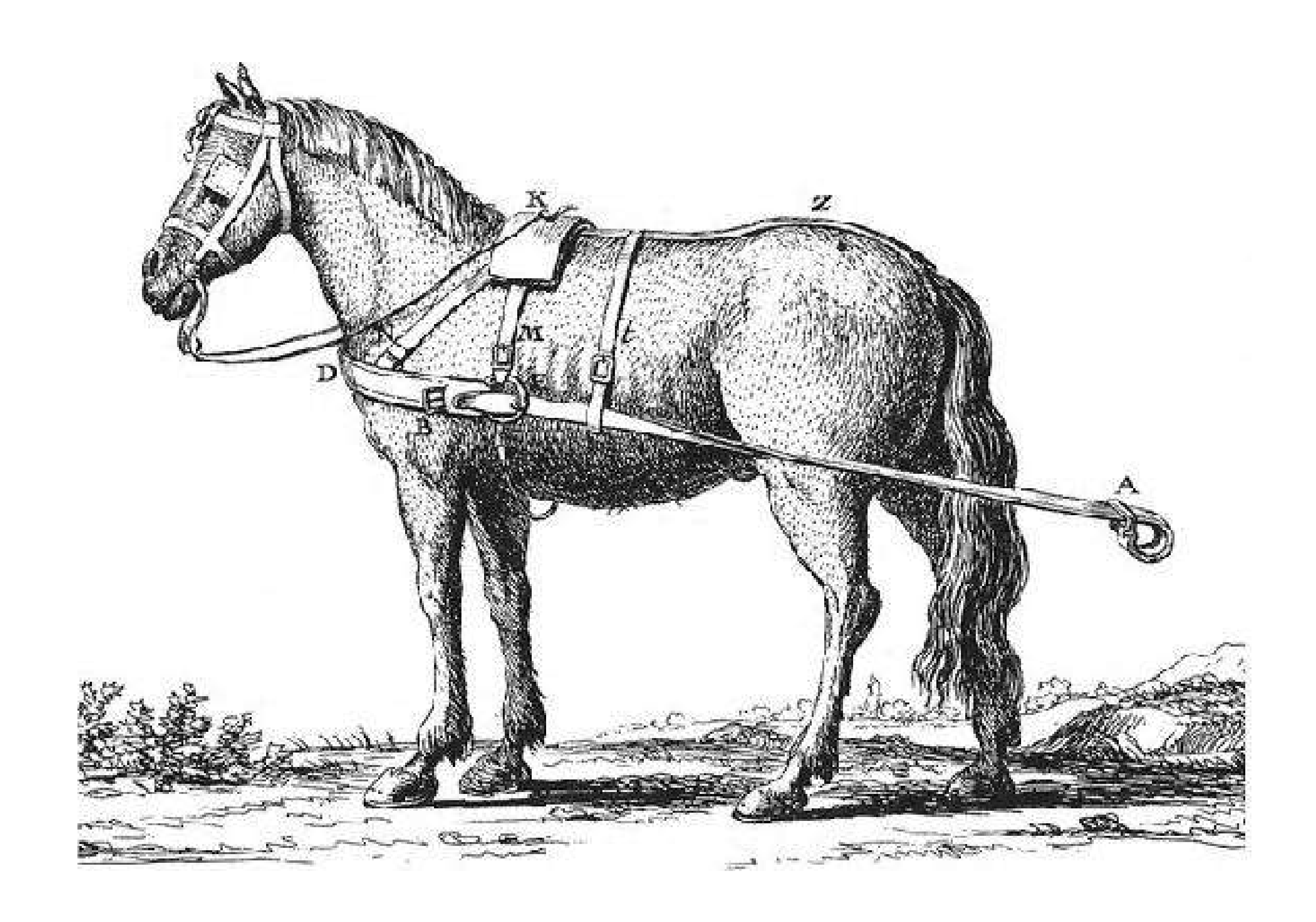
المربع 5.3

مقارنة أطقم الأحصنة وقوة الجر

على مدى عقود كررت كثير من الكتابات الادعاء بأن طقم الحصان المثبت بحزام العنق والصدر لم يكن ملائماً لأعمال الحقل الشاقة بسبب زيادة ارتفاع نقطة الجر وأثرها الخانق الناجم عن السير المحيط بالعنق. وقد بنيت هذه النتيجة على تجارب فعلية على طقم أعاد بناءه عام 1910 ضابط فرنسي اسمه ريشار لوفيفر دي نويت (1856-1936) ونشر عام 1924 في كتابه القوة المحركة عبر العصور *La Force Motrice à travers les Âges*. ولم تحظ هذه النتائج بالقبول لدى كثير من الكلاسيكيين وحسب، بل أقرها ثلاثة من كبار مؤرخي التقدم التقني في القرن العشرين: جوزيف نيدام Joseph Needham أ(1965) ولين وايت Lynn White أ(1978) وجان جيمبل Jean Gimpel أ(1997).

لكن تلك النتائج اعتمدت على عملية إعادة بناء مغلوطة: فالتجارب التي أجراها جان سبرويت Jean Spruytte خلال السبعينيات من القرن الماضي على نير ظهري أعيد بناؤه بشكل صحيح (وضع مباشرة خلف الحارك وثبت بسيور صدرية) لم يتمخض عن أي تأثير خانق، وكان أداء النير جيداً حين كان حصانان يجران ما وزنه 1 طن (سبرويت 1977). وقد فند هذا النير الادعاءَ بأن «نظاماً خاطئاً في تطقيم الحيوانات» أعاق الحراثة الكلاسيكية (ريبسيت Raepsaet أ2008، 581). لكن سبرويت استخدم في تجربته عربة خفيفة من عربات القرن التاسع عشر (أخف من العربة الرومانية) لذا، إذا أهملنا الاختلاف في حجم الحصان، لما استطاعت تجاربه أن تعكس الظروف السائدة قبل ألفي عام. على أي حال، وبسبب الحدود التي فرضها القانون التيودوسي (439 بعد الميلاد) على وزن العربات التي تجرها الأحصنة (500 كغ)، «بدا من المؤكد أن الرومان كانوا على وعي بمعاناة الأحصنة حين تجر أحمالاً ثقيلة» (جانز 2004، 179).

يتألف نير الطوق العادي من هيكل خشبي بيضاوي وحيد يسمى السمط (وقد صار معدنياً فيما بعد) مبطن لراحة الحصان حين يوضع على عاتقه، وغالباً مع طوق منفصل تحته. وتربط السيور الجلدية بالسمط فوق عظمتي كتف الحصان



الشكل 3-5

حزام الصدر في طقم الحصان. صورة مقتبسة من الموسوعة الفرنسية (ديدرو ودالمبير 1769-1772). ظل هذا الحزام قيد الاستعمال حتى القرن العشرين.

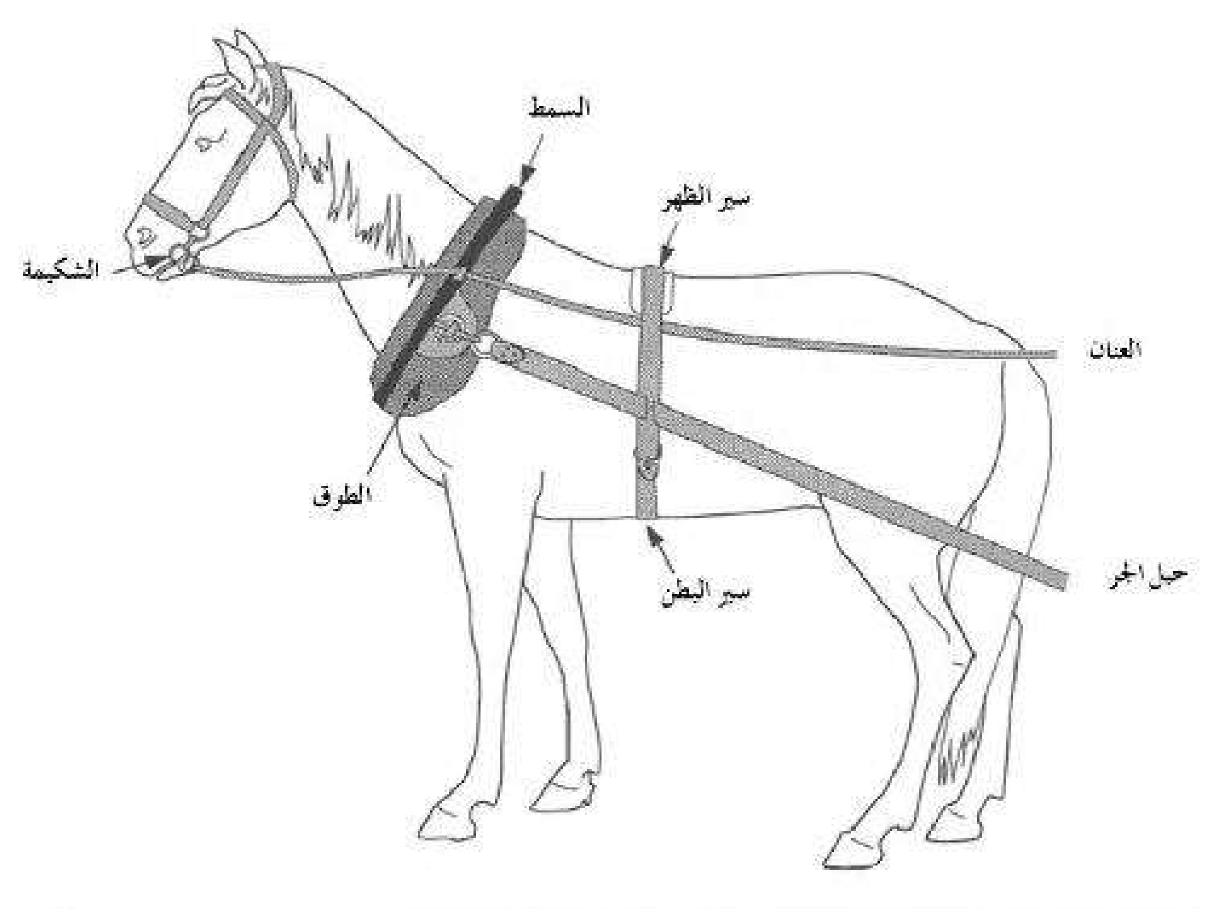
(الشكل 3-6). ويمكن التحكم بحركة الحصان بوساطة اللجام، والشوكة (القطعة المعدنية) بفمه المربوطة بالرسن والمثبة بالعذار[18]. ويوفر نير العنق زاوية جر منخفضة محبذة، ويتيح جهداً ثقيلاً من خلال استخدام عضلات الحيوان الصدرية وعضلات الكتف القوية. ويسمح نير الطوق أيضاً بجمع أكثر من حيوان في نسق منفرد أو مزدوج عند أداء عمل شاق مضن.

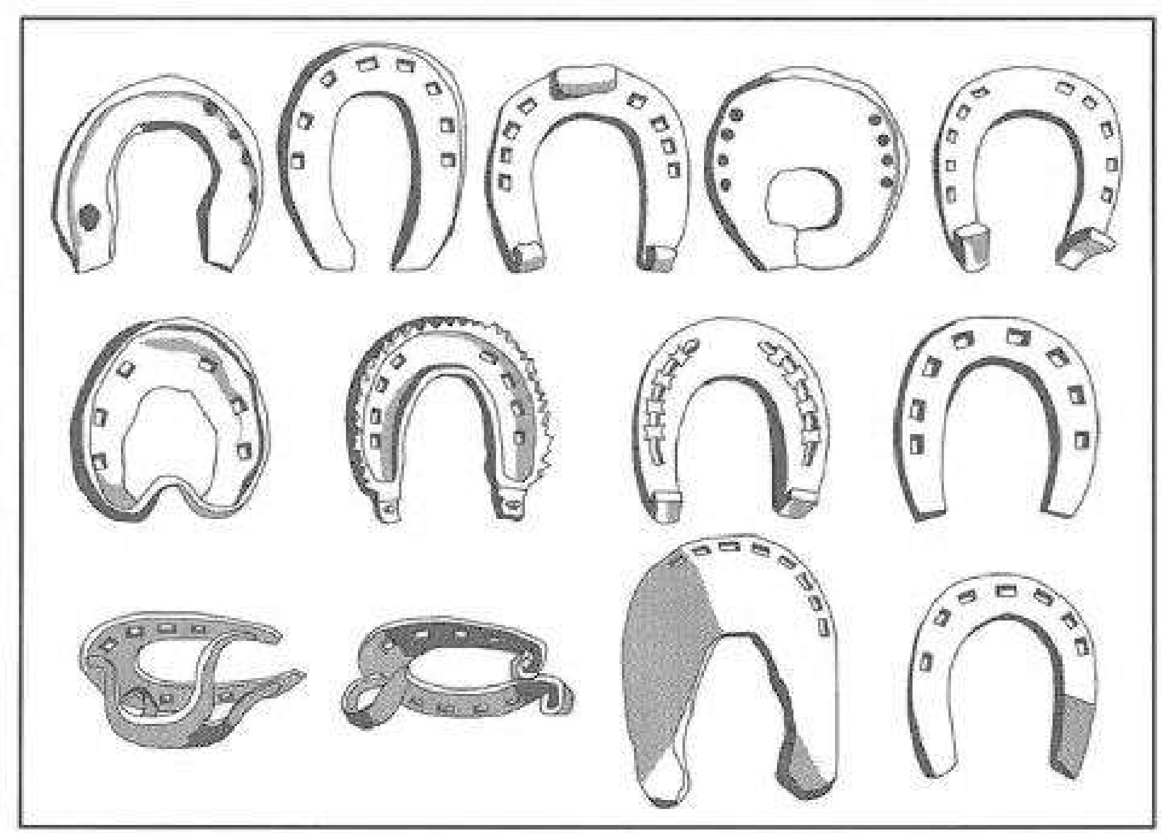
لم تكن كفاءة النير الشرط المسبق الوحيد لأداء الحصان العالي، لذلك لم يكن إدخاله ليحدث ثورة زراعية (غانز Gans أ2004). كانت الأحصنة التي تؤدي أعمالاً شاقة تعلف قمحاً، وهذا ما يتطلب دورة زراعية، وكانت بحاجة إلى أطقم وحدوات مكلفة، في حين أنه كان من الممكن علف الثيران، وهي أضعف وأبطأ، تبناً وعصافةً وتطقيمها بتكلفة زهيدة. ويذكر أن حدوات الحصان هي قطع معدنية ضيقة على شكل الحرف U تثبت بمسامير على أطراف حوافر الحصان غير الحساسة

(الشكل 3-6). ويخفف استعمالها من تآكل حوافر الحصان الطرية ويزيد من قوة الجر والتحمل. كان لذلك أهمية خاصة في المناخ البارد والرطب السائد في شمال أوروبا وغربها. إذ لم تكن متوافرة لدى الإغريق حيث كانوا يغلفون الحوافر بصنادل جلدية محشوة بالقش. أما الرومان فكانوا يعرفون حدوات الحصان (لكن النعال الحديدية *soleae ferreae* عندهم كانت تثبت بمشابك وأربطة جلدية) أما الحدوات المثبتة بالمسامير فلم تنتشر إلا بعد القرن التاسع.

كان العمود الارتكازي الأفقي المشدود بالسيور الجلدية المترابطة والمثبتة بأدوات الحقل، يعادل الضغط الناجم عن الجر غير المتساوي. كما سهلت هذه المعدات قيادة الحيوانات وأتاحت تطقيم عدد مفرد أو مزدوج من الأحصنة. وللأحصنة قوة تحمل أكبر (فهي تعمل 8 - 10 ساعات يومياً بالمقارنة مع 4- 6 ساعات في حال البقر) كما أنها تُعمَّر أطول، ومع أن الثيران والأحصنة تبدأ العمل وهي في 3-4 من العمر فإن الثيران لا تعيش أكثر من 8- 10 سنوات، في حين أن الأحصنة تعيش 15-20 عاماً. وأخيراً، فإن تشريح ساق الحصان يعطي الحيوان ميزة فريدة بإزالة كلفة الطاقة الناجمة عن الوقوف. فللحصان رباط بالغ القوة على امتداد القسم الخلفي من قصبة الساق وزوج من الأوتار (عضلات مصبعة قابضة، سطحية وعميقة) تستطيع «إحكام تثبيت» الطرف من دون التأثير في العضلات. وهذا يمنح الحيوان فرصة الراحة وحتى النوم واقفاً من دون أي كلفة استقلابية، وأن يصرف القليل من الطاقة وهو يرعى (سمايذ 1967). أما بقية الحيوانات فتحتاج إلى 10% من الطاقة الإضافية وهي واقفة أكثر ما لو كانت مستلقية.

وحتى الحيوانات الصغيرة سيئة الأطقم أحدثت فرقاً كبيراً (إزماي Esmay وهول Hall أ1968؛ روغين Rogin أ1931؛ سليشر فان باث van Bath Slicher أ1963). فالفلاح الذي يستخدم معزقة يحتاج إلى 100 ساعة عمل على الأقل، وإلى 200 ساعة في تربة ثقيلة، ليعد هكتاراً من الأرض لزراعة الحبوب. لكن بإمكانه إنجاز هذا العمل في


السمط
سير الظهر
الشكيمة
العنان
الطوق
حبل الجر
سير البطن



الشكل 6-3

مكونات نير الطوق الأنموذجي في القرن التاسع عشر (مقتبس من تيلين Telleen أ1977 وفيليه Villiers أ1976) وأشكال من حدوات منتصف القرن الثامن عشر (ديدرو ودالمبيرت 1769-1772). أشكال الحدوات (بدءاً من اليسار) هي إنجليزية، إسبانية، ألمانية، تركية، وفرنسية.

ثلاثين ساعة باستخدام محراث خشبي بسيط يجره ثور. وما كان باستطاعة الزراعة المعتمدة على المعزقة أن تحقق المستوى الذي تحقق باستخدام الحيوانات. وبصرف النظر عن تسريع عمليات الحراثة والحصاد، فقد يسرت الحيوانات العاملة رفع كميات كبيرة من ماء الري من الآبار العميقة، وساعدت في تشغيل آلات معالجة الطعام مثل المطاحن، وآلات الضرس، والمكابس بمعدلات فاقت القدرات الآدمية. ولم يكن توفير الراحة من عناء العمل ساعات طويلة أقل أهمية من تحقيق معدلات إنتاج أعلى، لكن المزيد من عمل الحيوان تطلب المزيد من الأراضي الزراعية لزراعة العلف. وقد تحقق هذا بسهولة في أمريكا الشمالية وفي أجزاء من أوروبا حيث كانت العناية بالأحصنة تستهلك ثلث المساحة الزراعية أحياناً.

لا عجب إذن في أن تكون الماشية حيوانات الجر هي المفضلة في الصين وفي البلدان الآسيوية الأخرى مكتظة السكان. فعلى اعتبار أن هذه الحيوانات مجترة، فإن من الممكن علفها بالتبن والرعي وحسب. وحين تكون في العمل لا داعي لعلفها بالحبوب لأنها تستطيع الحصول على العلف بشكل رئيس من بقايا المحصول مثل النخالة والكُسبة[19]. وفي تقديري أن الزراعة التقليدية في الصين تخسر سنوياً نحو 5% من محصول المساحة المزروعة علفاً لحيوانات الجر. وفي الهند أيضاً كان العلف يستحوذ على 5% من محصول الأراضي المزروعة، لكن معظم هذا العلف تستهلكه حيوانات الحليب، وبعضها يخصص لعلف الأبقار المقدسة (هاريس Harris أ1966؛ هستون Heston أ1971). ويستحوذ علف العجول العاملة على أقل من 3% من سائر الأراضي الزراعية. وفي أكثر المناطق كثافة سكانية في شبه القارة الهندية تعيش الأبقار على الرعي في جوانب الطرقات وضفاف القنوات وعلى التهام المنتجات الجانبية من المحاصيل مثل القش المتخلف عن الأرز وكُسبة الخردل وأوراق الموز المقطعة (أودندال Odend'hal أ1972).

كانت حيوانات الجر الصينية أو الهندية صفقات غنية بالطاقة. فكثير منها لم يكن ينافس الناس على محصولها، في حين أن بعضها شغل على الأكثر أرضاً زراعية ينمو فيها من الزرع سنوياً ما يكفي شخصاً واحداً. لكن عملها السنوي المفيد كان يعادل ثلاثة إلى خمسة فلاحين يعملون 300

يوم في السنة. صحيح أن الحصان الأمريكي أو الأوروبي المتوسط في القرن التاسع عشر لم يكن قادراً على إعطاء هذا المردود العالي نسبياً، لكنه كان نعمة غنية بالطاقة (المربع 3-6)، وكان عمله السنوي المفيد يعادل عمل ستة عمال من الفلاحين. أما الأرض المخصصة لعلفه (بما في ذلك الحيوانات غير العاملة) فكان باستطاعتها أن تطرح من الطعام ما يكفي لستة أشخاص تقريباً. وحتى لو اعتبرنا أن حصان الجر في القرن التاسع عشر كان مجرد بديل للعمل الآدمي المرهق، فإن الاحتفاظ به كان مبرراً، لكن الأحصنة القوية جيدة العلف قادرة على أداء أعمال يعجز الإنسان عن أدائها أو تحملها.

إن الأحصنة قادرة على جر الحطب، وانتزاع جذوع الأشجار من الأرض حين حول البشر الغابات إلى أراضٍ زراعية، وعلى تفتيت تربة البراري الخصبة من خلال الحراثة العميقة، وجر الآلات الثقيلة. كانت هناك طبعاً كلفة إضافية من الطاقة للعمل الحيواني بصرف النظر عن امتلاك قطيع يتكاثر، وتوفير الطعام الملائم، والقيام بأعمال الحقل؛ هذه التكاليف الإضافية من الطاقة تظهر بالدرجة الأولى في صنع أطقم الخيل وحدواتها وتوفير الإصطبلات لها. لكن كانت هناك فوائد إضافية أيضاً مستمدة من الروث المعاد تدويره، ومن الحليب واللحم والجلد. بالإضافة إلى أهمية إعادة تدوير الروث في كل الزراعات التكثيفية على اعتبار أن الروث مصدر لمواد عضوية مغذية. في المجتمعات النباتية بصفة خاصة تعد اللحوم (بما فيها لحم الحصان في بعض أجزاء أوروبا) والحليب مصادر قيّمة للبروتين الكامل. أما الجلد فيستخدم في صنع عدد كبير من الأدوات الضرورية للأعمال الزراعية والصناعات التقليدية. وكانت الحيوانات تتناسل من تلقاء أنفسها بالطبع.

المربع 3-6

تكلفة الطاقة، ومدى كفاءتها، وأداء حصان الجر

يحتاج الحصان البالغ الذي يزن 500 كغ نحو 70 ميغا جول من الطاقة القابلة للهضم يومياً ليحافظ على وزنه (اللجنة الفرعية لتغذية الخيل 1978). ولو كان علفه غنياً بالحبوب، لصار من الممكن أن يشمل ذلك 80 ميغا جول وحسب من الطاقة المستهلكة؛ ولو كان معظم العلف من التبن القابل للهضم فإن المعدل قد يرتفع إلى 100 ميغا جول. وكانت متطلبات العلف بحسب طبيعة العمل 1.5-1.9 ضعفاً من الحاجة البدنية. وقد وجد برودي Brody أ(1945) أن حصاناً من سلالة بيرشيرون وزنه 500 كغ ويعمل بمعدل 500 واط يعطي نحو 10 ميغا جول /سا. ومع 6 ساعات من العمل و18 ساعة من الراحة (عند 3.75 ميغا جول/سا) تكون الحصيلة نحو 125 ميغا جول /يوم.

وليس من الغريب إذن أن توافق توصيات العلف التقليدي على أنه في بداية القرن العشرين طلب إلى المزارعين الأمريكيين أن يقدموا العلف إلى أحصنتهم العاملة بمعدل 4.5 كغ من الشوفان

و4.5 كغ من التبن يومياً (بايلي Bailey أ1908) وهذا يعني 120 ميغا جول/يوم. وبقوة وسطية تبلغ 500 واط، يعطي الحصان نحو 11 ميغا جول من العمل المفيد خلال 6 ساعات، وفي حين أن الرجل العادي يعطي أقل من 2 ميغا جول، مع أنه لايستطيع الحفاظ على جهد منتظم فوق 80 واط ولم يتمكن من تحقيق قمم قصيرة فوق 150 واط، فإن باستطاعة الحصان العمل بانتظام عند معدل 500 واط مع قمم جر قصيرة تفوق 1 ك واط، وهو عمل يتطلب جهود اثني عشر رجلاً.

الرَّي

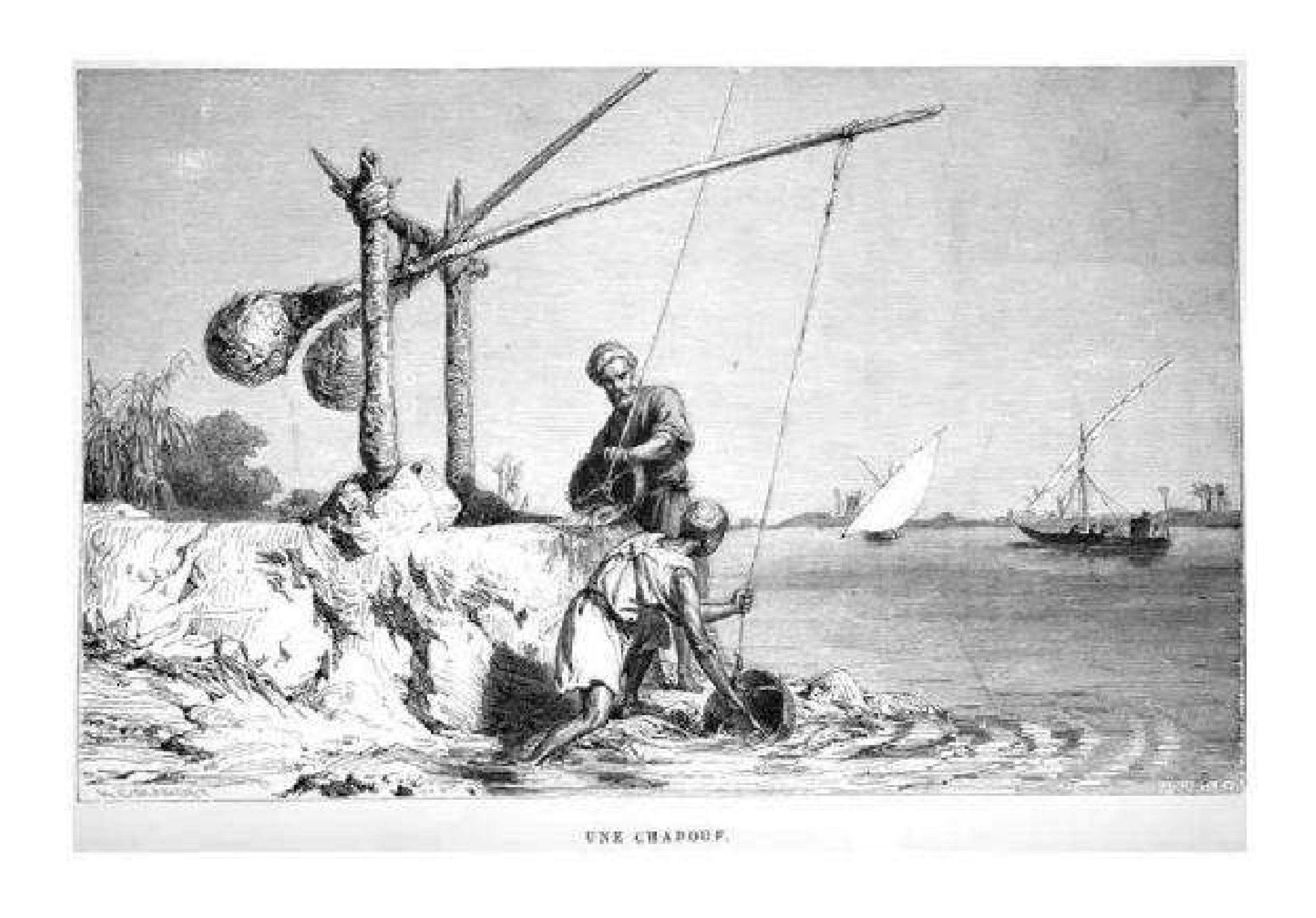
تعتمد حاجة المحصول إلى الماء على عدد من المتغيرات البيئية، والزراعية، والوراثية، لكن الحاجة الإجمالية الموسمية تقدر بنحو 1000 ضعف من كتلة الغلال من الحبوب. فزراعة طن واحد من القمح تحتاج إلى 1.500 طن من الماء، كما يجب توفير 900 طن من الماء لكل طن من الأرز. ويكفي نحو 600 طن من الماء لزراعة طن واحد من الذرة الصفراء، وهو محصول غني بمادة C4 وعالي الكفاءة المائية، والحبوب الرئيسة ذات أعلى معدلات الكفاءة باستعمال الماء (دورنبوس وآخرون Doorenbos et al.أ1979؛ بوس Bos أ2009). وهذا يعني أن إنتاج ما بين 1 و2 طن/هكتار يحتاج إلى كمية من الماء خلال الفصول الأربعة التي تحتاجها زراعة المحصول 15-30 سم. وفي المقابل، نرى أن معدل الأمطار السنوية في المناطق الجافة وشبه الجافة في الشرق الأوسط يتراوح بين نذر يسير و25 سم كحد أقصى.

تحتاج الزراعة في مثل هذه المواقع إلى السقاية بمجرد انتهاء موسم الفيضان في الحقول بعد تشبع تربة الوديان بالماء ما يتيح فرصة النضج لأحد المحاصيل، أو حالما يحتاج السكان الذين تتزايد أعدادهم إلى زراعة محصول ثانٍ خلال موسم انحسار المياه. والسقاية ضرورية أيضاً للتعامل مع شح المياه الموسمي. ويتجلى هذا على الأخص في أقصى المناطق الشمالية من آسيا ذات الأمطار الموسمية مثل البنجاب، وفي سهول شمال الصين. أما زراعة الأرز فتحتاج إلى ترتيبات خاصة لغمر الحقول وتجفيفها.

عند الاعتماد على الجاذبية في السقاية - أي السقاية باستعمال القنوات، والأحواض، والخزانات أو السدود - لا حاجة إلى رفع الماء، ما يقلل من تكلفة الطاقة. أما في وديان الأنهار قليلة الانحدار وفي السهول الزراعية الشاسعة، فقد كان من الضروري دائماً رفع كميات كبيرة من المياه السطحية أو الجوفية. وكثير من عمليات رفع المياه كانت إلى ضفة قليلة الارتفاع، ولو أنها كثيراً ما كانت تجتاز ضفافاً منحدرة، أو تأتي من آبار عميقة. وما يعيق العملية قلة الكفاءة التي لايمكن تجنبها والتي يزيدها سوءاً عدم الدقة في صنع الأجزاء المتحركة وحاجتها إلى التشحيم في معظم الحالات. وتمثل السقاية التي تعتمد على الجهد العضلي الآدمي عبئاً ضخماً حتى في المجتمعات

حيث يكون العمل الشاق هو العرف المعتاد. وقد كان للإبداع دور كبير في تصميم أجهزة ميكانيكية تستخدم القوة الحيوانية أو المائية لتخفيف العبء - ورفع الماء إلى ارتفاعات أكبر.

لقد اخترعت آلات ميكانيكية تستحق الإعجاب لرفع مياه الري (يوبانك Ewbank أ1870؛ مولنار Molenaar أ1956؛ أوليسون Oleson أ1984، 2008؛ مايز Mays أ2010). وأبسط هذه الآلات - وهي غرافات أو سلال، أو دلاء تشبه المغرفة مصنوعة من نسيج كتيم أو مبطنة - كانت تستخدم لرفع الماء متراً واحداً على الأكثر. فالغراف أو الدلو المتدلي بحبل من حامل ثلاثي القوائم كان أكثر فعالية نوعاً ما. وقد استخدم كلا الجهازين في شرق آسيا والشرق الأوسط، لكن أقدم طرق رفع المياه التي استعملت على نطاق واسع كانت الرفع بالثقل المكافئ، المعروفة بالعربية بالشادوف الذي لوحظ للمرة الأولى على خاتم أسطواني بابلي يعود إلى 2000 ق. م. واستعمله قدماء المصريين على نطاق واسع، ثم وصل إلى الصين عام 500 ق.م. وشاع استعماله في شتى أنحاء العالم القديم. والشادوف بالأصل عمود خشبي يتمحور حول عارضة أو عمود وهو سهل الصنع والإصلاح (الشكل 3-7).



الشكل 3-7

صورة تعود إلى القرن التاسع عشر يظهر فيها فلاحان مصريان يستعملان الشادوف (Corbis).

يعلق دلو الانغماس في طرف الذراع الطويلة ويعلق حجر أو كتلة من الطين الجاف في الطرف الآخر ليكون ثقلاً مكافئاً. أما قوة الرفع الفعالة فتعادل عادة 1- 3م، لكن وضع سلسلة من الآلات في مستويين أو حتى أربعة مستويات كان شائعاً في الشرق الأوسط. فرجل واحد كان باستطاعته أن يرفع 3 م^3/سا إلى ارتفاع 2- 2.5م. فشد الحبل يمكن أن يكون صعباً، لكن تدوير لولب أرخميدس (ويعرف عند الرومان باسم كوتشلي cochlea وفي العربية بالطنبور) ليدور لولبياً داخل أسطوانة كان يحتاج إلى قوة أكبر ويعطي قوة رفع ضئيلة (25- 50 سم). أما الدواليب التي تعمل بقوة الساقين فكانت شائعة في آسيا. واستعملت سلالم الماء (آلات العمود الفقري للتنين long gu che) التي كانت تعمل كسلسلة مضخات خشبية من ألواح مربعة ذات سلسلة من ألواح صغيرة تمر فوق ترس مسنن وتشكل سلسلة لانهاية لها ترفع الماء عبر مجرى خشبي (الشكل 3-8). يدخل سن التحريك في عمود أفقي يحركه رجلان أو أكثر يستندون إلى عمود. كانت بعض السلالم تعمل بأعمدة دوران تدار باليد، أو تديرها حيوانات تمشي بحركة دائرية.

جميع الآلات التالية كانت تعمل بطاقة الحيوان أو بطاقة الماء الجاري. فرفع الماء بالحبل والدلو، وهي طريقة منتشرة في الهند، كانت تدار بزوجين أو أربعة أزواج من الثيران تسير على منحدر وهي تجر قربة جلدية مربوطة بحبل طويل. أما الإغريق فكانوا يستعملون سلسلة لا نهاية لها من الجرار الفخارية مثبتة على حلقتين من الحبال بوضع مقلوب تحت طبل خشبي تمتلئ من النهاية السفلية وتفرغ في مجرى في الأعلى. وتعرف هذه التقنية باسمها العربي - الساقية - وقد انتشرت الآلة في جميع أرجاء حوض البحر الأبيض المتوسط. وحين تدار بوساطة حيوان مربوط العينين ويسير في مسار دائري، كانت ترفع الماء من آبار لايزيد عمقها عادة على 10 م بمعدل لا يتجاوز 8 م^3/سا. وثمة نسخة مصرية محسنة تسمى زوافة كانت ترفع الماء بمعدل أعلى (يصل إلى 12 م^3 من بئر عمقها 6 م).

والناعورة آلة أخرى واسعة الانتشار في البلاد الإسلامية والصين (هونغ تشيه



الشكل 8.3

آلة العمود الفقري للتنين القديمة في الصين يديرها فلاحان يستندان إلى عمد ويدوسان على محور ذي أوتاد. مقتبسة من صورة قديمة تعود إلى أسرة مينغ.

hong che) وكان لها جرار فخارية وأنابيب من الخيزران أو دلاء معدنية تثبت بإطار عجلة واحدة. ومن الممكن إدارة العجلات عبر تروس قائمة الزاوية تحركها حيوانات تسير بخط دائري أو بوساطة تيار مائي حين تزود بألواح خشبية. كانت الحاجة إلى رفع الجرار نصف قطر عجلة آخر فوق مستوى المجرى الذي يتلقى الماء سبباً في ضياع كثير من الكفاءة، لكن الطبلية المصرية تغلبت على هذه المعضلة. ففي هذه الآلة المطورة التي تحركها الثيران، عجلة معدنية مزدوجة تغرف الماء بحافتها الخارجية وتسكبه في الوسط في قناة جانبية. وتوضح المقارنات بين متطلبات القوة، والرفع، والمردود بالساعة الخاص برفع الماء بالطرق التقليدية محدودية الأداء الآدمي (المربع 3-7، الشكل 3-9).

كانت الطاقة الخاصة بالسقاية التي يديرها البشر باهظة الكلفة. فباستطاعة عامل واحد أن يقطع هكتاراً من القمح بمحش ذي مهاد في ثماني ساعات، لكنه يحتاج

المربع 3-7

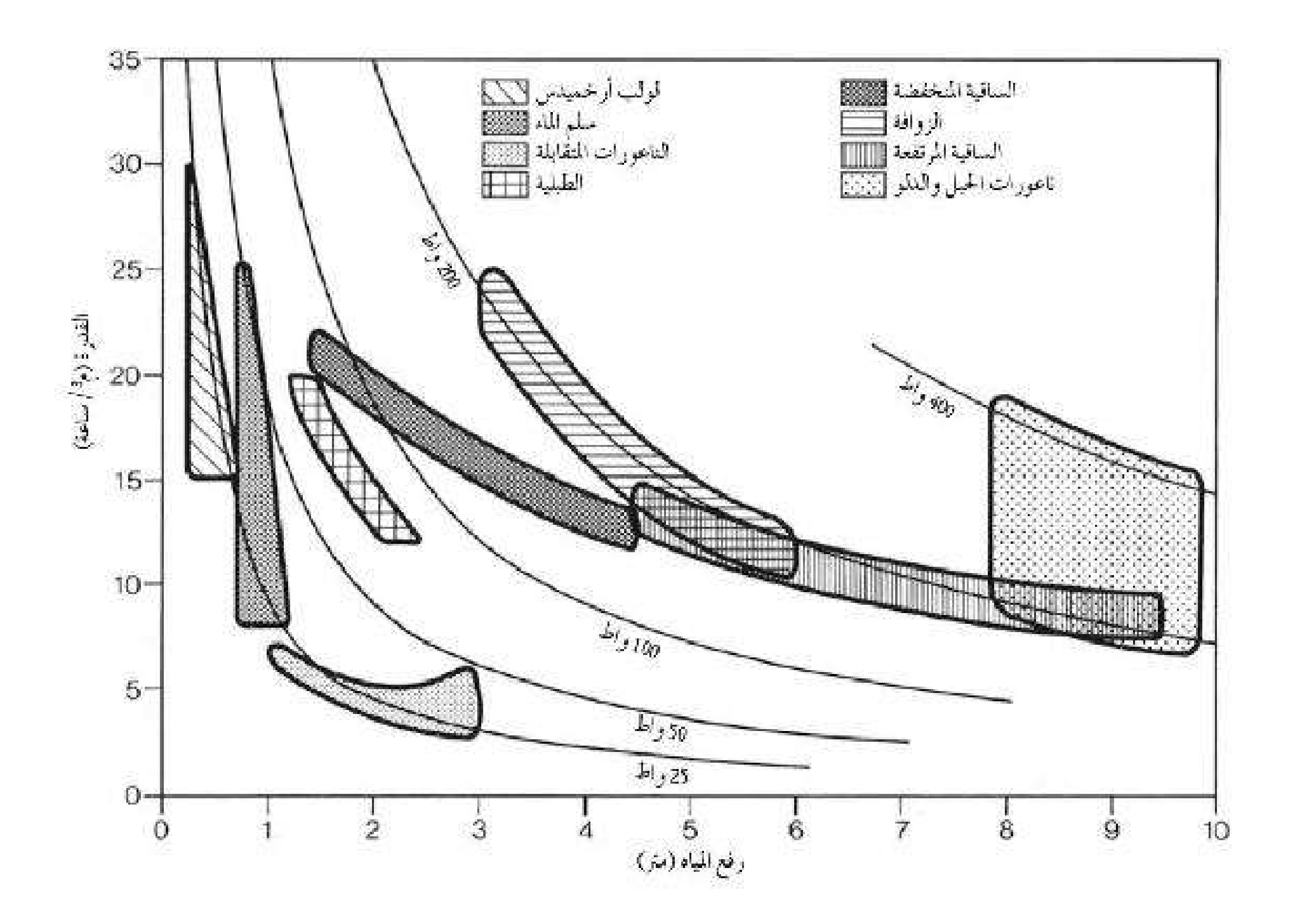
متطلبات القوة، والرفع، وقدرات آلات رفع المياه التقليدية

الآلات	البشر/ الحيوانات	الرفع (م)	السعة ($م^3$/سا)	العمل ك ج	الدخل ك ج	الكفاءة (%)
الغرافات	-/2	0.6	5	30	440	7
غرافات معلقة	-/2	1	8	80	440	18
الشادوف	-/1	2.5	3	75	220	34
لولب أرخميدس	-/2	0.7	15	100	440	23

عجلة الدواسات	1/-	05	12	60	220	27
سلم الماء	2/-	0.7	9	60	440	14
الحبل والدلو	3 /4	9	17	1.500	5.690	26
الساقية	1 /2	6	8	470	2.740	17
الزوافة	1 /2	6	12	710	2.740	26
ناعورة الرفع العالي	1 /2	9	9	790	2.740	29
ناعورة الرفع المنخفض	1 /1	1.5	22	325	1.480	22
الطبلية	1 /1	2.5	12	295	1.480	20

ملحوظة: حسبت كلفة الطاقة على افتراض أن متوسط دخل القدرة للبشر 60 واط و350 واط لحيوانات الجر.

المصادر: جمعت وحسبت من معلومات وردت في مولنار (1956)، فوربز (1965) نيدام وآخرون (1965) ومايز (2010).



الشكل 3-9

مقارنة عمليات الرفع، والحجوم ومتطلبات القدرة في أجهزة رفع المياه وآلاتها في العصر ما قبل الصناعي. مقتبسة من معلومات وردت في مولنار (1956)، فوربز (1965) نيدام وآخرون (1965).

إلى ثلاثة شهور (8 سا/ يوم) ليرفع نصف كمية المياه المطلوبة متراً واحداً من قناة جانبية أو جدول ماء. كما أن وجود فوارق هائلة في استجابة المحصول للماء يجعل أي تعميم يخص مردود طاقة السقاية التقليدية مستحيلاً. فالأمر ليس منوطاً بالفوارق الهائلة بين المحاصيل وحسب، بل إن استجابة المحصول تعتمد على توقيت توافر المياه (الفول السوداني لا يتأثر بشح المياه مؤقتاً، لكن الذرة الصفراء شديدة التأثر). ويبين مثال واقعي أن مردود الطاقة يمكن بسهولة أن يكون 10 أضعاف أو أكثر (المربع 3-8).

وفي المقابل، تعين أن يكون صافي مردود الطاقة الخاص ببعض المشروعات لدى الإنكا منخفضاً. فالسقاية اعتماداً على الجاذبية لا تحتاج إلى رفع الماء، لكن

المربع 3-8

عائدات الطاقة الخاصة بسقاية القمح

تبين عملية حسابية معينة عائدات الطاقة الكبيرة الخاصة بالسقاية التقليدية. فقد بينت الدراسات الميدانية أن محصول القمح الشتوي ينحدر إلى النصف حين يقل هطول الأمطار السنوية بنسبة 20% في أثناء فترة الإزهار الحرجة (دورنبوس وآخرون 1979). فمحصول متأخر من محاصيل أسرة تشينغ يبلغ 1.5 طن / هكتار ينحدر بمقدار 150 كغ في حقل صغير أنموذجي مساحته 0.2 هكتار ما يجعل العجز بمقدار 10 سم في الأمطار يتطلب في السقاية 200 طن من الماء - لكن بما أن كفاءة السقاية بطريقة الثلم والحافة لا تزيد على 50% (بسبب التسرب عبر التربة والبخر) فإن الكمية الفعلية المتوافرة من قناة الري يجب أن تكون مضاعفة. فرفع 400 طن من الماء لارتفاع لا يزيد على 1 م بوساطة سلم يديره فلاحان يدوسان على البدالات يتطلب 80 ساعة ونحو 65 ميغا دول من طاقة الطعام، في حين أن الغلة من القمح تحوي (بعد طرح نحو 10% للبذار وخسائر التخزين) نحو 2 جيغا جول من الطاقة القابلة للهضم. وبالنتيجة تعطي عملية السقاية باستعمال البدالات التي تدار بالأرجل طاقة غذائية تفوق تكلفة الطعام بثلاثين مرة.

حفر قنوات طويلة وعريضة (يبلغ عرض الخطوط الرئيسة 10- 20 م) في أراضٍ صخرية وبمعدات بسيطة يحتاج إلى عمل مكثف. فالقناة الشريانية الرئيسة بين باركوي Parcoy وبيكوي Picuy تمتد مسافة 700 كم لتسقي المراعي والحقول (مرة Murra أ1980) وقد ذهل الفاتحون الإسبان حين رأوا قنوات جيدة البناء تحمل المياه إلى مجموعة صغيرة من حقول الذرة. كان أي مشروع رئيس من مشروعات الري يحتاج إلى تخطيط وتنفيذ دقيق للحفاظ على الميول الملائمة، ويتطلب تعبئة أعداد ضخمة من العمال. أما العائدات - مخرجات الطاقة الغذائية من المحاصيل المروية التي تفوق العمل الهائل المستثمر - فتستغرق سنوات، وأحياناً عقوداً عدة. ولم يكن بوسع أي جهة تنفيذ برامج بناء عامة مثل هذه إلا حكومات مركزية تتمتع بالاستقرار وقادرة على نقل الموارد بين مختلف أجزاء أراضيها. وفي معظم الحالات، كانت إدارة المياه للحصول على محصول أوفر تتعلق بسقاية الحقل، لكن بعض الزراعات تمكنت من تكثيف محاصيلها من خلال عملية معاكسة.

في كثير من المناطق ما كان للزراعة المستمرة أن تنشأ لولا تجفيف المياه الزائدة. فالإمبراطور يو (2205- 2198 ق. م.) وهو واحد من الحكماء السبعة العظام ما قبل الكومفوشيين، مدين بمكانته في تاريخ الصين إلى خطته الرئيسة وتنظيمه البطولي في سعيه الدؤوب لتجفيف مياه الفيضانات

(وو Wu أ1982). كما تبنت مجتمعات المايا وسكان حوض المكسيك أشكالاً أشد تكثيفاً من زراعة المحاصيل التي تتطلب تعاملاً مع المياه بدءاً من إعداد المدرجات وسقاية الربيع وانتهاء بنظم الصرف الدقيقة والبناء التكثيفي للحقول المرتفعة (ساندرز، بيرسون وسانتلي Sanders, Parsons, and Santley أ1979؛ فلانيري Flannery أ1982؛ مايز وغوروخوفيتش Gorokhovich أ2010). ولقد ظهر نوع فريد من زراعة الصرف على مدى قرون عدة في جزء من إقليم غوانغ دونغ الصيني (ردل Ruddle وزونغ Zhomg أ1988) حيث كانت الممرات التي تفصل بين أحواض أسماك الشبوط تزرع زراعة تكثيفية. إن إعادة تدوير الفضلات العضوية - مخلفات الإنسان، والخنازير، ودود القز، وبقايا الحصاد، والأعشاب، والأعشاب الطفيلية، وترسبات الأحواض - دعمت محصولاً جيداً من شجر التوت لدود القز، وقصب السكر، والأرز والعديد من الخضر والفاكهة، وكميات كبيرة من السمك.

التسميد

يوفر الماء وثاني أكسيد الكربون في الجو الكربون والهيدروجين، وهما العنصران اللذان يكونان جل الأنسجة النباتية على شكل مواد كربوهيدراتية جديدة. لكن ثمة عناصر أخرى ضرورية جداً لعملية التركيب الضوئي. وتبعاً للكمية المطلوبة، فإنها تصنف تحت اسم المغذيات الكبيرة أو المغذيات الدقيقة. والنوع الأخير هو الأكثر عدداً، ويضم بالدرجة الأولى الحديد والنحاس والكبريت والسيليكا والكالسيوم. وهناك ثلاثة مغذيات كبيرة وحسب، وهي النيتروجين N، والفوسفور P والبوتاسيوم K. لكن النيتروجين هو أهم هذه العناصر على الإطلاق حيث يوجد في سائر الإنزيمات والبروتينات،وهو العنصر الذي يرجح أن يكون ناقصاً في الأراضي التي تزرع باستمرار (سميل 2001؛ باركر Barker وبلبيم Pilbeam أ2007). إن حصاد ا ط/ هكتار من القمح (المحصول الفرنسي أو الأمريكي الأنموذجي هو 1800) ينزع (بالحب والقش) نحو 1 كغ من الكالسيوم Ca والمغنيزيوم Mg، و2.5 كغ من الكبريت S و4 كغ من البوتاسيوم، و4.5 كغ من الفوسفور، و20 كغ من النيتروجين (لالو وآخرون Laloux et al أ1980).

يعمل المطر، والغبار، والذبول وإعادة تدوير بقايا المحاصيل في معظم الحالات على تعويض خسارة الفوسفور والبوتاسيوم والمغذيات الدقيقة، لكن استمرار الزراعة بلا أسمدة يسبب نقصاً في النيتروجين، وبما أن توافر النيتروجين يحدد بدرجة كبيرة حجم الحبة ومحتوياتها من البروتين، فإن هذا النقص يعوق النمو، ويعطي محصولاً سيئاً قليل القيمة الغذائية. ومن الممكن للزراعة التقليدية أن تعوض النيتروجين بطرائق ثلاث وحسب: عن طريق إعادة تدوير بقايا المحصول غير المرغوب فيها، أي بحراثة جزء من القش أو السوق التي لم تنزع من الحقول لاستخدامها علفاً للحيوانات، والوقود، والاستعمالات المنزلية الأخرى؛ وباستعمال مواد عضوية متنوعة، وعلى رأسها رش البول والبراز الحيواني والآدمي، والفضلات العضوية الأخرى الممزوجة بأوراق الأشجار؛ وبزراعة محاصيل بقولية ترفع معدل النيتروجين في التربة وتعدّها لمحصول جديد غير بقولي (سميل 2001؛ بيركليان Berklian أ2008).

يعد التبن مصدراً رئيساً من مصادر النيتروجين الممكنة، رغم محدودية إعادة تدويره. فعلى عكس النباتات الحديثة قصيرة الساق، نرى أن كمية التبن في السلالات التقليدية المزروعة أكبر من كمية الحب حيث تكون نسبة التبن إلى الحب 1:2. أما حراثة مقادير ضخمة من الكتلة النباتية فمن الممكن أن تكون عبئاً ضخماً على كثير من الحيوانات - لكن مثل هذه الحالة لم يحدث أبداً. ولم يحرث في التربة إلا جزء ضئيل من بقايا المحاصيل لأنها كانت تستخدم علفاً ومفرشاً للحيوانات (وعندها فقط يعاد تدويرها في الروث)، كما تستخدم وقوداً في المنازل، أو كمادة أولية من مواد البناء والصناعة. أما في الغابات، فكان القش وسوق النبات تحرق في الحقل وهذا يعني عملياً فقدان كامل النيتروجين.

لقد اكتملت عملية إعادة تدوير البول والبراز في أوروبا وشرق آسيا عبر القرون. ففي المدن الصينية، كان يعاد تدوير نسبة كبيرة من الفضلات الآدمية (70- 80%). وبالمثل، كانت جميع الفضلات البشرية في خمسينيات القرن السابع عشر يعاد تدويرها في إدو (طوكيو اليوم) (تاناكا Tanaka أ1998). لكن فائدة هذه الممارسة كانت وقفاً على توافر هذه الفضلات وقلة المواد المغذية في محتوياتها، كما أن الممارسة تتطلب كثيراً من العمل المتكرر والشاق. وحتى قبل الخسارة الناجمة عن التخزين والنقل، لم يتجاوز متوسط الفضلات البشرية سنوياً 3.3 كغ N/ للفرد (سميل 1983). وقد تسبب جمع هذه الفضلات وتخزينها ونقلها من المدن إلى الأرياف المحيطة بها بانتشار صناعات كثيرة كريهة الرائحة دامت حتى في أوروبا طوال القرن التاسع عشر تقريباً قبل اكتمال نظام القنوات. وقدر بارل Barles أ(2007) أن باريس في عام 1869 كانت تنتج سنوياً نحو 4.2 ميغا طن من النيتروجين N أي نحو 40% من روث الخيل، ونحو 25% من الفضلات البشرية؛ وبحلول أواخر القرن التاسع عشر كان نصف فضلات المدينة تقريباً يجمع ويعالج صناعياً لإنتاج سلفات الأمونيا (بارل وليستل Lestel أ2007).

تتطلب إعادة تدوير كميات أكبر من الفضلات الحيوانية - بما فيها تنظيف الإصطبلات والزرائب، وتخمر السوائل، أو مزج الفضلات قبل رشها في الحقل - كثيراً من الوقت. وبما أن معظم الروث لا يحتوي إلا على 0.5% من النيتروجين، وبما أن خسائر ما قبل الرش وخسائر الحقل من المادة المغذية تصل إلى 60% من المحتويات الأصلية، فقد كان من الضروري رش كميات كبيرة من الفضلات العضوية لإنتاج محصول أعلى. في القرن الثامن عشر، كانت الحقول في مولفلاندرز تتلقى وسطياً 10 ط/هكتار، وقد وصل بعضها إلى 40 طناً / هكتار من الروث، والفضلات البشرية، والكسبة، والرماد، وكانت المعدلات الأنموذجية في فرنسا ما قبل الثورة نحو 20 طن/ هكتار (سليخر فان باث 1963؛ تشورلي Chorley أ1981). وبالمثل، تبين التفاصيل أن الصين في عشرينيات القرن الماضي حققت معدلاً على مستوى البلاد كلها يزيد على 10 أطنان/ هكتار وأن المزارع الصغيرة في جنوب غرب الصين كانت تتلقى 30 طناً/هكتار تقريباً (بك 1937).

استعملت في الزراعة التقليدية كل الفضلات العضوية التي يمكن تصورها سماداً. ويذكر كاتو في كتابه «الزراعة De agri cultura» مخلفات الطيور، والماعز، والغنم، والبقر، «وكل صنوف الروث الأخرى» بالإضافة إلى خلائط القش، والترمس، والعصافة، وسوق الفصوليا، وقشور

البذور والثمار، وأوراق البلوط، وقد عرف الرومان أن تدوير محاصيل الحبوب مع البقوليات يزيد المحصول (كانوا يعتمدون على الترمس، والفاصولياء والبيقة[20]. كما كان استعمال الآسيويين للفضلات العضوية خاضعاً للاختيار أكثر ويتراوح بين فضلات غنية نسبياً بالنيتروجين (الكسبة وفضلات الأسماك) وطمي القنوات والأنهار وقلة قليلة من المادة المغذية. ومع نمو المدن، استخدمت فضلات الطعام (وعلى رأسها بقايا النبات)، مصدراً جديداً من المواد القابلة لإعادة التدوير.

ويعد زرق الطيور (الغوانو) السماد العضوي الذي يحوي أعلى نسبة من النيتروجين (نحو 15% في أفضل الأنواع) وهو فضلات طيور البحر المحمية في المناخ الجاف في الجزر المنتشرة على ساحل بيرو. وقد أعجب الفاتحون الإسبان باستعمال الإنكا لهذا السماد (مرة 1980). بدأت الولايات المتحدة استيراد السماد عام 1824، وإنجلترا عام 1840؛ كما شهدت خمسينيات القرن التاسع عشر زيادة في معدلات الاستيراد، لكن بحلول عام 1872 توقف تصدير المخلفات الغنية من جزر التشنتشا في البيرو (سميل 2001). بعد ذلك صارت النترات التشيلية أهم مصدر في العالم من مصادر النيتروجين التجاري على اعتبار أن زراعات البلدان الصناعية بدأت في دعم محاصيلها بدخول من الوقود، والمعادن، والآلات، الأسمدة غير العضوية، وهي عملية سنصفها بالتفصيل في الفصل الخامس.

وتباينت عمليات رش الأسمدة على الحقول تبايناً كبيراً، حيث اعتمدت على نسب الروث المسترجع (عالية جداً عند الحيوانات في الحظائر، وقليلة جداً عند حيوانات الرعي) والمواقف المختلفة نحو التعامل مع فضلات البشر (تتراوح بين المنع وبين إعادة التدوير الروتيني) وكثافة الزرع. وأي تقديرات نظرية للنيتروجين في الفضلات المعاد تدويرها بعيدة جداً عن إسهامها الفعلي. وهذا مرده إلى الخسائر الجسيمة (وبصورة خاصة بسبب تطاير الأمونيا وارتشاحه إلى المياه الجوفية) الناجمة عن التفريغ، والجمع، والخلط، والنثر وأخيراً امتصاص النبات للنيتروجين (سميل 2001). هذه الخسائر، وهي عادة ما تتجاوز ثلثي كمية النيتروجين الأصلية، زادت الحاجة إلى نثر كميات هائلة من الفضلات العضوية. ونتيجة لذلك، ينبغي في كل الزراعات التقليدية الكثيفة، تخصيص قدر كبير من أعمال المزرعة إلى الأعمال الكريهة الشاقة وهي جمع الفضلات العضوية وتخميرها ونقلها ونثرها في الحقول.

أما في أوروبا فقد استعمل الروث الأخضر سماداً منذ أيام الإغريق والرومان كما استخدم على نطاق واسع في شرق آسيا حيث اعتمدت هذه الممارسة على محاصيل البقوليات التي تثبت النيتروجين، وبالدرجة الأولى على البيقة (Astragalus, Vicia) والبرسيم (Trifolium,) Melilotus) ومن ثم على حشيشة الخبز (الفلفا) (Medicago sativa). وباستطاعة هذه النباتات تثبيت 100-300 كغ نيتروجين N/هكتار سنوياً وحين تدور مع المحاصيل الأخرى (تزرع عادة كمحصول شتوي في المناطق المعتدلة) تضيف في غضون ثلاثة إلى أربعة أشهر قبل أن تحرث في باطن الأرض 30-60 كغ نيتروجين N إلى التربة لتمتصها الحبوب التالية أو محاصيل الزيوت وترفع من معدل إنتاجها.

إن الكثافة السكانية المرتفعة تدعو إلى زراعة محصول غذائي آخر في أشهر الشتاء. وهذه الممارسة تقلل بالتأكيد مجمل النيتروجين الموجود وتؤثر في المحصول، لكنها من حيث الطاقة أكثر فائدة على المدى القريب، وتنتج مواد كربوهيدراتية وزيوتاً إضافية. وعلى المدى البعيد فإن توفير كمية ملائمة من النيتروجين مهم جداً بحيث لا تستطيع الزراعات المكثفة الاستغناء عن البقوليات المثبتة للنيتروجين والتي ينبغي أن تزرع بدلاً من السلالات الغذائية. هذه الممارسة السنوية المرغوبة أو التي تشكل جزءاً من سلاسل دورات زراعية أطول، تمثل في الزراعة التقليدية الوصول بالطاقة إلى القيمة المثلى بشكل يستحق الإعجاب. لذا فإنه ليس من الغريب أن تشكل لب سائر النظم الزراعية الكثيفة التي تعتمد على الدورات الزراعية المعقدة، لكن ذلك كان بين 1750 و1880 حين كانت الدورات القياسية، بما فيها محاصيل الغطاء البقولي (المتمثل في تتابع زراعة القمح واللفت والشعير والبرسيم لأربع سنوات)، معتمَدة على نطاق واسع في أوروبا، إذ ضاعفت معدل تثبيت النيتروجين التعايشي وزادت المحاصيل غير البقولية ثلاث مرات على الأقل (كامبل Campbell وأوفرتن Overton أ1993).

أدرك تشورلي (1981، 92) أن هذا التغير يخص زمناً بعينه، ويبرر تسميته بالثورة الزراعية:

> بالرغم من وفرة التقدم، نتيجة العديد من التغيرات الصغيرة، فقد كان هناك تغير كبير على جانب كبير من الأهمية: تعميم المحصيل البقولية وزيادة كمية النيتروجين التي تبعت ذلك التعميم. أليس من العجيب إذن أن نقارن أهمية هذا الاختراع المهمَل بأهمية قوة البخار إبان التطور الاقتصادي الأوروبي في عصر التصنيع؟

لقد فسر ريغلي Wrigley أ(2002) منجزات الزراعة الإنجليزية من خلال مقارنة أدائها في 1300 و1800. كما وثق ملدرو Muldrew أ(2011) كيف أدت التغيرات بعد 1650 إلى زيادة التنوع في النظم الغذائية وقيمتها، وكيف شجعت تطورات النظام الغذائي لدى العامل على رفع الإنتاجية، وإيجاد فرص عمل ثابتة، ورفاهية متزايدة.

تنوع المحاصيل

تهيمن الفلاحة الأحادية على الزراعة الحديثة، وهي زراعة المحصول ذاته كل سنة، ما يعكس التخصص الإقليمي للزراعة التجارية. لكن زراعة السلالات ذاتها المرة تلو الأخرى له تكلفة عالية من حيث الطاقة والبيئة إذ تحتاج الأرض إلى الأسمدة لكي تعوض فقدان المغذيات، وإلى مبيدات الحشرات التي تنتشر في المزارع الشاسعة المتماثلة. فالفلاحة الأحادية لمحاصيل الأثلام، مثل الذرة الصفراء حيث يظل معظم التربة معرضاً للمطر قبل إغلاق المظلات، تزيد معدل الحت في

الأراضي المنحدرة، كما أن الزراعة المستمرة للأرز في الأراضي المغمورة المحرومة من الأكسجين تفسد نوعية التربة.

لقد أدرك قدامى المزارعين بخبرتهم الطويلة مخاطر الزراعة الأحادية. وفي المقابل، نرى أن تدوير الحبوب ومحاصيل البقول إما أن يعوض نيتروجين التربة، أو يخفف على الأقل من ضياع احتياطياتها. فزراعة أنواع الحبوب، والدرن، والزيت، ومحاصيل الليف يقلل من مخاطر فشل المحاصيل فشلاً كاملاً، ويضعف احتمال ظهور آفات عصية على المبيدات، ويقلل الحت، ويحافظ على جودة التربة (لورنس وآخرون Lowrance et al أ1984؛ وزارة الزراعة الأمريكية 2014). ومن الممكن اختيار الدورات الزراعية لتتلاءم مع ظروف التربة والمناخ وتلبي حاجة حمية غذائية مفضلة بعينها؛ ومع أنها مرغوبة إلى حد كبير من وجهة نظر زراعية، إلا أنها تحتاج إلى المزيد من العمل عند زراعة أكثر من محصول واحد سنوياً (تعدد المحصول). أما في الأماكن المعرضة إلى فترات الجفاف، فتزيد الحاجة إلى السقاية، وإلى الكثير من التسميد في حال تعدد المحصول التكثيفي حين تزرع ثلاثة، أو حتى أربعة، محاصيل مختلفة سنوياً في الحقل ذاته. وتزداد كمية العمل المطلوب حين يزرع محصولان أو أكثر في حقل واحد في ذات الوقت (الزراعة المتداخلة) بحيث تكون المكافأة الأساسية لتعدد المحصول هي قدرة مساحة الأرض المزروعة ذاتها على خدمة عدد أكبر من السكان.

كان تنوع المحاصيل التقليدية وترتيب دوراتها هائلاً. فعلى سبيل المثال، بلغ عدد النظم الزراعية في عملية المسح الثانية التي أجراها بك للزراعة في الصين 547 نظاماً في 168 منطقة (بك Buck أ1937). لكن العديد من التعميمات المهمة كانت واضحة أبرزها الممارسة العالمية التي أشرنا إليها من قبل، ألا وهي الربط بين البقوليات والحبوب. فبالإضافة إلى إسهام البقوليات في خصوبة التربة وإمدادها بالبروتين، فإن بعضها، وبالأخص فول الصويا والفول السوداني، يعطي زيوتاً جيدة قابلة للأكل لطالما كانت محل ترحيب في النظم الغذائية التقليدية. أما الكُسبة، وهي المادة المتكتلة المتبقية من عصير الزيت، فصارت علفاً غنياً بالبروتين للحيوانات الأليفة، أو أسمدة عضوية ممتازة.

أما العمومية الثانية فقد أشرنا إليها من قبل أيضاً، وهي أن لتدوير الروث الأخضر مع محاصيل الغذاء مكاناً مهماً في الزراعة التقليدية التكثيفية. والثالثة، وهي تدوير المحاصيل، تعكس الرغبة في إنتاج الألياف بالإضافة إلى المواد الكربوهيدراتية الرئيسة (الحبوب، والدرن) ومحاصيل الزيوت. ونتيجة لذلك، شملت الزراعة الصينية خططاً عدة لتدوير القمح، والأرز، والشعير مع فول الصويا، والفول السوداني أو السمسم ومع القطن والجوت. وبالإضافة إلى الحبوب الرئيسة (القمح، والجاودار، والشعير، والشوفان) والبقوليات (البازلاء، والعدس، والفول) زرع الفلاحون الأوروبيون أيضاً الكتان والقنب للاستفادة من أليافها. وتضمنت محاصيل المايا الأنواع الثلاثة الرئيسة من زراعة العالم الجديد - الذرة الصفراء، والفول والكوسا - بالإضافة إلى الدرن (البطاطا السكرية، والمنيهوت، والجيكاما) والأغاف (الصبار) الأمريكي والقطن للاستفادة من أليافها (أتود Atwood أ2009).

لآلاف السنين، بدا الجمود في ممارسات الزراعة التقليدية واضحاً جلياً: نثر يدوي لبذور الحبوب في الأراضي الجافة، وعمل شاق يقصم الظهر يتمثل في نقل بادرات الأرز إلى الحقول المغمورة بالماء؛ وتطقيم ثيران متثاقلة، وتوجيه المحاريث الخشبية، وحصاد المحصول يدوياً باستعمال المنجل أو المحش ودرسه بوساطة النورج (الجرجر) أو المدرس اليدوي أو بالاستعانة بالحيوانات. هذا الثبات الظاهر في العمليات المتكررة كان يخفي العديد من التغيرات ولو أنها متدرجة دائماً تقريباً. وتراوحت هذه التجديدات بين انتشار تقنيات زراعية أفضل، وتبني محاصيل جديدة.

كان لانتشار المحاصيل أعمق الأثر من خلال إدخال محاصيل كربوهيدراتية أساسية (مثل الذرة الصفراء والبطاطا) وأنواع من الخضر والفاكهة الغنية بالمغذيات الدقيقة. فبعض عمليات الانتشار هذه كانت بطيئة متعددة المسالك. فعلى سبيل المثال، أدخل الخيار (Cucumis sativus) إلى أوروبا من خلال عمليتي انتشار منفصلتين: أولاً (قبل ظهور الإسلام) براً من بلاد الفرس (إلى أوروبا الشرقية والشمالية) ثم عن طريق البحر إلى الأندلس (باريس Paris، داوني Daunay، ويانك 2012). ولا ريب في أن أهم صنوف انتشار المحاصيل الجديدة التي تمخضت عن نتائج مهمة كانت تلك التي حدثت في أعقاب الغزو الأوروبي لأمريكا، والذي كان سبباً في تبني العالم للبطاطا، والذرة، والطماطم، والفلفل، واستغلال المحاصيل الاستوائية مثل أشجار الأناناس والبابايا والفانيلا والكاكاو (فوستر Foster وكوردل Cordell أ1992؛ ريدر Reader أ2008). ولعل أفضل طريقة لتقييم التطور الزراعي هي تدبر الترتيبات الزراعية التقليدية الأربعة المستمرة، ومن بعدها صنوف التقدم السريع في الزراعة ما قبل الصناعية في أمريكا الشمالية.

تاريخياً، في المقام الأول كانت الزراعة في الشرق الأوسط وتمثله الممارسات المصرية. فالعقبات الطبيعية هناك (ضيق الأراضي الزراعية وغياب الأمطار) ونعمة بيئية لامثيل لها (فيضان النيل السنوي يجلب مياهاً منتظرة ويوفر مواد مغذية) اجتمعت لإعطاء زراعة غزيرة الإنتاج في عصور الأسر الحاكمة الأولى. وفي مطلع القرن العشرين، وبعد فترة ركود طويلة، حافظ الفلاحون المصريون على إنتاج أعلى مخرجات الزراعة الشمسية الممكنة (غير المدعومة بأي نوع من الطاقة الأحفورية).

أما الزراعة التقليدية الصينية، فتمثل زراعة منتجة في شرق آسيا تستحق الإعجاب. وقد تمكنت هذه الممارسات من دعم أكبر تجمع سكاني مترابط ثقافياً في العالم، واستمرت هذه الممارسات من دون تغيير حتى خمسينيات القرن العشرين. وقد أتاح هذا الاستمرار فرصة دراستها دراسة علمية والتوصل إلى إحصائيات موثوقة حول أدائها. فمجتمعات أمريكا الوسطى المعقدة كانت تعتمد على زراعة فريدة غزيرة الإنتاج بلا فلاحة ولا حيوانات جر. أما الزراعة الأوروبية فتطورت بسرعة من بدايات بسيطة في حوض المتوسط إلى مراحل متقدمة في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر. كما أن انتقال تقنيات الزراعة الأوروبية إلى أمريكا الشمالية ومعدل المخترعات الزراعية في الولايات المتحدة غير المسبوق في القرن التاسع عشر أوجد أكفأ الترتيبات الزراعية التقليدية في العالم.

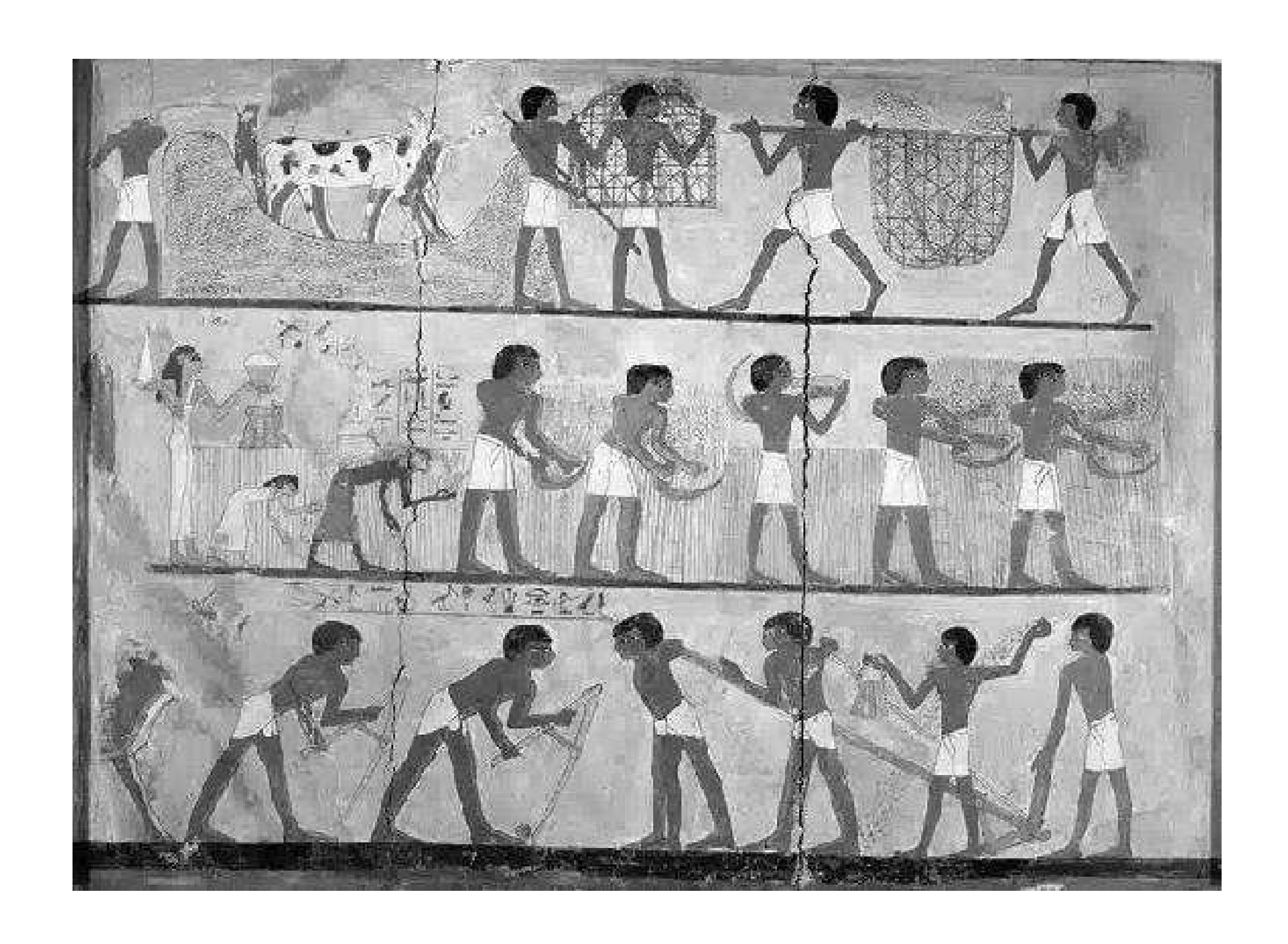
عاصرت الزراعة المصرية فيما قبل الأسر الحاكمة، والتي يمكن تتبعها إلى ما قبل عام 5000 ق. م. نشاطاً كبيراً في مجال الصيد (صيد الوعول والخنازير بالإضافة إلى التماسيح والفيلة) والطيور (البط والإوز) وصيد السمك (وهو سهل وبالأخص في المناطق الضحلة المغمورة بمياه الفيضان) وجمع النباتات (الأعشاب والجذور). كان الغنم (Ovis aries) أول الحيوانات المدجنة والقمح ثنائي الحبة والشعير ثنائي الصف أول الحبوب المزروعة، وكان بذار أكتوبر ونوفمبر يحل في أعقاب انحسار مياه النيل. أما تعشيب المحصول فنادر، وأوان الحصاد يحل بعد خمسة إلى ستة أشهر. وتشير الإحصاءات المبنية على السجلات الآثارية إلى أن الزراعة في عصر ما قبل الأسر الفرعونية كانت تطعم 2.6 نسمة/هكتار من الأرض المزروعة، لكن المتوسط على المدى الطويل كان على الأرجح نحو نصف ذلك المعدل.

وبفضل الري ازدهرت الزراعة المصرية على الدوام، لكن في المملكة القديمة (2705- 2205 ق. م.) والمملكة الحديثة (1550- 1070 ق.م.) كلتيهما فقد شمل هذا تحكماً بسيطاً نسبياً في مياه الفيضان السنوي من خلال بناء سدود أعلى وأقوى تغلق قنوات الصرف وتنشئ أحواض فيضان فرعية (بوتزر Butzer أ1984؛ مايز 2010). وعلى عكس بلاد ما بين النهرين أو وادي السند، فإن الري بالقنوات لم يكن خياراً متاحاً لأن قلة انحدار النيل (1: 12.000) جعلت فتح القنوات الفرعية مستحيلاً، وكان أول استخداماتها المحدودة في منخفض الفيوم أيام بطليموس (بعد 330 ق م).

وبالمثل، فإن غياب أجهزة رفع الماء الفعالة قيدت ري الأراضي الزراعية المرتفعة في عصر الأسر الحاكمة. فالشادوف، الذي استعمل منذ عصر العمارنة في القرن الرابع عشر ق.م.، كان يلائم سقاية أراضٍ صغيرة مثل البساتين. أما الساقية التي تديرها الحيوانات الضرورية لرفع الماء باستمرار وبسعة كبيرة فلم تدخل الخدمة إلا في عصر البطالمة.

ونتيجة لذلك، لم تكن هناك زراعة لمحاصيل الصيف في عصر الأسر الحاكمة، بل مزيد من زراعة الشتاء التكثيفية وفي مقدمها الحبوب مثل القمح والشعير، كما كان الحصاد يدوياً بمناجل خشبية مزودة بشفرات قصيرة من الصوان المسنن أو المثلم، والقش يقطع عالياً فوق الأرض، وأحياناً من دون السنبلة بقليل. وقد شاعت هذه الممارسة في أوروبا أيضاً، لسهولة الحصاد، وسرعة نقل المحصول إلى ساحة الدراسة، ونظافة الدراسة. وفي مناخ مصر الجاف كان القش المتبقي يقطع لاحقاً بحسب الحاجة لاستخدامه في الحياكة، وصنع الطوب، أو إحراقه كوقود للطبخ، كما تترك الجذامة علفاً للحيوانات المدجنة.

إن الرسومات التي عثر عليها في المقابر المصرية تبعث الحياة في هذه المشاهد. فالمشاهد من مقبرة أونسو Unsou تمثل الفلاحين وهم يعزقون الأرض، ويبذرون الحب، ويحصدون بالمناجل، ويحملون المحصول في سلال لكي يدرس بالاستعانة بالثيران (الشكل 3- 10). وتعبر كتابات من مقبرة باري Paheri تعبيراً بليغاً عن القيود الخاصة بالطاقة وواقع الزمان (جيمس James أ1984). فهناك مشرف يحث العمال على



الشكل 3-10

لوحات جدارية تبين النشاط الزراعي المصري مقتبسة من مقبرة Unsou شرقي طيبة من الأسرة الثامنة عشرة (المملكة الحديثة) (Corbis).

العمل: «*تحركوا؛ حركوا أقدامكم؛ الماء ينساب ويطال الرزم*». وإجابتهم: «*الشمس حارة! حبذا لو أعطيت الشمس ثمن الشعير سمكاً!*» - تلخص تماماً إرهاقهم وعلمهم بأن الحب الذي يفسده الطوفان يمكن تعويضه سمكاً.

أما الصبي الذي يضرب الثيران بالسوط فيحاول التخفيف عن الحيوانات العاملة: «*ادرسوا لأنفسكم، ادرسوا لأنفسكم... العصافة لكم لتأكلوها، والشعير لأسيادكم. لا تدعوا الكلل ينال من قلوبكم! كل شيء على ما يرام*». كان علف الثيران يتضمن بالإضافة إلى العصافة، الشعير وتبن القمح كما كانت ترعى على الأعشاب البرية التي تنمو في سهول الفيضان وتأكل البيقة المزروعة. ومع ازدياد الزراعة، كانت الأبقار تساق كل موسم لترعى في مستنقعات الدلتا. وكانت الثيران تشد عند الحراثة إلى نير مزدوج، وكتل التراب تفتت بمعازق ومطارق خشبية، والغنم تدوس البذور المنثورة وتطمرها بالأرض. ولا تتحدث سجلات المملكة القديمة عن أعداد كبيرة من الثيران وحسب، بل عن قطعان كبيرة من البقر، والحمير، والغنم، والماعز أيضاً.

حين أعاد بوتزر بناء التاريخ السكاني في مصر (1976) ذكر أن الكثافة السكانية في وادي النيل ارتفعت من 1.3 نسمة/هكتار في الأراضي الزراعية عام 2500 ق.م. إلى 1.8 نسمة/هكتار في 1250 ق.م. و2.4 نسمة/هكتار حين دمر الرومان قرطاجة (149-146 ق.م.). خلال حكم الرومان لمصر بلغت مساحة الأراضي الزراعية نحو 2.7 ألف هكتار منها ما يقرب 60% في دلتا النيل. وكان باستطاعة هذه الأراضي إنتاج أكثر من مرة ونصف من الطعام الذي يحتاجه سكانها البالغ عددهم خمسة ملايين آنذاك. وكان الفائض بالغ الأهمية بالنسبة إلى رفاهية الإمبراطورية الرومانية فقد كانت مصر أكبر مزوديها بالحبوب (ريكمان Rickman أ1980؛ إردكامب Erdkamp أ2005). بعد ذلك بدأت الزراعة في مصر بالانحدار ودخلت في حالة الركود.

ومنذ العقد الثاني من القرن التاسع عشر لم تكن البلاد تزرع أكثر من نصف مساحة الأرض التي كانت تزرعها أيام الحكم الروماني. لكن بفضل وفرة الإنتاج، استطاعت هذه الأرض دعم العدد ذاته من السكان الذي كان يدعمه ضعفا هذه المساحة داخل البلاد وخارجها قبل ألفي عام تقريباً. لقد زاد الإنتاج سريعاً بعد انتشار الري الموسمي بعد 1843 حين بدأت السدود على النيل تغذي شبكة القنوات بالماء. وارتفع مؤشر المحاصيل المتعددة الوطني من مجرد 1.1 في ثلاثينيات القرن التاسع عشر إلى 1.4 في عام 1900 وفي العشرينيات من القرن العشرين تجاوز المؤشر 1.5 (وتربري Waterbury أ1979). كانت الزراعة لا تزال تعتمد على الطاقة الحيوانية، لكنها بدأت بالاعتماد على الأسمدة غير العضوية، وكان الفلاحون يوفرون الطعام لستة أشخاص من كل هكتار من الأراضي الزراعية.

الصين

شهدت إمبراطورية الصين فترات اضطراب وركود طويلة إلا أن الزراعة التقليدية فيها تميزت بالابتكار أكثر من الزراعة المصرية بكثير (هو Ho أ1975؛ براي 1984؛ لاردي Lardy أ1983؛ لي Li أ2007). وكما كانت الحال في بقية الأماكن، لم تكن المراحل الأولى من الزراعة

الصينية تكثيفية على الإطلاق. فقبل القرن الثالث ق.م. لم يكن هناك ري على نطاق واسع، ولم يعرف الناس سوى القليل من الزراعة المزدوجة أو الدورات الزراعية - إن وجدت أصلاً. كانت المحاصيل السائدة هي الدخن في الأراضي الجافة في الشمال، والأرز المروي بمياه الأمطار في حوض نهر يانغتسي، كما كانت الخنازير أقدم الحيوانات المدجنة وأكثرها عدداً - أما أقدم برهان على وجودها فيعود إلى 8.000 سنة (جينغ Jing وفلاد Flad أ2002) - لكن البرهان الواضح على استعمال الروث في التسميد لم يظهر إلا بعد 400 ق.م.

بينما كانت مصر تزود الإمبراطورية الرومانية بالفائض من الحبوب (خلال حكم أسرة هان 206 ق.م.-220 م) طور الصينيون العديد من الأدوات والممارسات لم يتسن لأوروبا والشرق الأوسط استعمالها إلا بعد قرون أو حتى آلاف السنين. وقد تضمنت صنوف التقدم هذه قبل كل شيء المحاريث المزودة بالسكة (الحديدة المعقوفة لطرح التراب جانباً)، ونير العنق للأحصنة، وحفارات البذار، ومراوح التذرية الدوارة. وقد دخلت كل هذه الاختراعات الاستعمال على نطاق واسع في بواكير حكم أسرة هان (206 ق.م. - 9م.). ولعل أهمها كان انتشار استخدام المحراث ذي السكة المصنوعة من الحديد الصب.

هذه المحاريث المصنوعة بالكامل من معدن لاينكسر (أتقن صبه بحلول القرن الثالث ق.م.) زادت في إمكانات الزراعة بالإضافة إلى تسهيلها العمل المضني. صحيح أنها أثقل وزناً.من المحاريث الخشبية، إلا أنها أقل احتكاكاً، ويمكن لحيوان واحد جرها حتى في التربة الطينية المغمورة بالمياه. كذلك قللت أدوات البذار من خسارة البذور التي تنشأ عادة عن البذار اليدوي، واختصرت مراوح التذرية التي تدار بعمود دوران زمن تنظيف الحبوب بعد درسها. أما تكدين (تطقيم) الأحصنة بنير العنق فلم يحدث فرقاً كبيراً في أعمال الحقل لأن الثيران في الشمال الفقير بقيت الخيار الأرخص مقارنة بالأحصنة (التي تحتاج العلف أو الحبوب) كما استعملت جواميس الماء المكدنة بنير العنق في الحقول الجنوبية الطينية.

صحيح أنه لا يمكن مقارنة أي عهد من عهود الأسر الحاكمة بفترة أسرة هان من حيث التغيرات الأساس في الزراعة (زو Xu ودل Dull أ1980)، لكن التقدم تباطأ فيما بعد، ومع أفول القرن الرابع عشر الميلادي كانت تقنيات الزراعة راكدة تقريباً. ويعود الفضل في أكثر من نصف إنتاج الحبوب المحسن بقليل بين أسرة مينغ (1368-1644) وأوائل عهد أسرة تشينغ (1644-1911) إلى التوسع في المساحة المزروعة (بيركنز Perkins أ1969). وقد كانت زيادة كمية العمل - وبالأخص المزيد من السقاية والتسميد - وراء معظم الزيادة المتبقية. أما البذور المحسنة والمحاصيل الجديدة، لاسيما الذرة الصفراء، فقد أحدثت فارقاً إقليمياً إلى حد ما.

ومما لا شك فيه أن تصميم نظم الري وبناءها وصيانتها كان أهم الإسهامات وأبقاها للمحاصيل التكثيفية في الصين (الشكل 3-11). وخير ما يثبت لنا قِدم هذه التصاميم أن نصف المشروعات التي كانت تعمل في عام 1900 اكتملت قبل عام 1500 (بيركنز 1969). وتعود أصول أشهر هذه المشروعات - سيشوان جيانغ جيان - إلى القرن الثالث ق.م. وهو المشروع الذي لا يزال يروي حقولاً عدة تنتج الغذاء لعشرات الملايين من الناس - (يونسكو 2015ب). وقد أغلق قاع

نهر مين جيانغ عند نقطة دخوله إلى سهل غوانسيان ثم تفرع مجرى النهر إلى فروع أخرى جراء رؤوس سهام صخرية بنيت في المجرى الأوسط.

كان الماء يحوّل إلى قنوات فرعية وتتحكم بجريانه بوابات وسدود. أما مواد البناء الرئيسة فكانت سلال من الخيزيران مُلئت بالأحجار. وقد ضمن رفع الوحل من قاع النهر وإصلاح البوابات المائية خلال مواسم انحسار الماء بقاء نظام الري في حالة جيدة لأكثر من 2.000 عام. فالبناء والصيانة المستمرة لمشروعات الري هذه (مع



الشكل 3-11

مساحة صغيرة من مدرجات زراعة الأرز المعروفة باسم ظهر التنين longji شمالي غولين في غوانغسي التي تعود أصولها إلى أسرة يوآن (1271- 1368). المصدر:

.https://en.wikipedia.org/wiki/Longsheng_Rice_Terrace#/media

بناء قنوات الملاحة وتنظيفها من الوحل) يحتاج إلى تخطيط طويل الأجل، وحشد كمية ضخمة من العمل، وإلى استثمار رأسمال ضخم. ولا يمكن تلبية أي من هذه المتطلبات من دون سلطة مركزية فعالة. ومن الواضح أنه كانت هناك علاقة تآزر بين المشروعات المائية الواسعة التي تستحق الإعجاب في الصين وظهور البيروقراطيات الهرمية واكتمالها واستمراريتها.

يلاحظ أن استخدام الجهد الآدمي في رفع المياه عملية شاقة تستغرق وقتاً طويلاً، كما كانت باهظة التكلفة من حيث الطاقة - لكن هذا كان شأن مكافأة ازدياد الغلال أيضاً. فحين يوفر الري كميات إضافية من المياه للمحاصيل خلال الفترات الحرجة، كان صافي الطعام، عائداته المباشرة من الطاقة (ما خلا كلفة بناء قنوات الري وصيانتها)، يصل بسهولة إلى نحو 30 (انظر المربع 3-8). إن تعويض النقص في المياه في فترات النمو غير الحرجة كان يعيد من طاقة الطعام نحو 20 ضعفاً في الحصاد الإضافي على شكل غذاء يستهلكه الفلاحون وهم يحركون سلالم ضخ المياه بأقدامهم.

في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين وصل معدل إضافة الروث وفضلات الإنسان بصفة عامة في مناطق زراعة الأرز في الصين إلى 10 أطنان/هكتار. فقد كانت كميات هائلة من الفضلات العضوية تجمع في المدن والقرى وتنقل إلى الأرياف حيث أنشئت صناعات كبيرة تعتمد على النقل ومعالجة الفضلات (المربع 3-9). وقد أعجب الرحالة الغربيون باستخدام الصينيين المكثف للروث إذ كانوا يجهلون مدى التطابق بينه وبين الممارسة الأوروبية فيما مضى (كينغ King أ1927). لكن ما من ثقافة تستطيع أن تتجاوز أعلى معدلات استخدام الفضلات العضوية في التسميد الذي كان يدعم الزراعة التكثيفية في منطقة السدود والأحواض المعروفة باسم غوانغ دونغ في جنوب الصين بنحو 50 طناً من الفضلات البشرية و270 طناً من مخلفات الخنازير في الهكتار الواحد (ردل وجونغ 1988).

إن خلط كثير من الفضلات العضوية الأخرى- مثل خادرات دود القز وطين القنوات والأحواض، والأعشاب المائية والكسبة - ورشها مباشرة زاد أعباء الجمع والتخمير والتوزيع. لذا لم يكن غريباً أن يكرس 10% من كمية العمل في الزراعة الصينية التقليدية للتعامل مع الأسمدة، وفي سهل الصين الشمالي كان التسميد المكثف للقمح والشعير بصفة عامة يستهلك أكبر قدر من الجهد المكرس لهذين المحصولين (نحو خمس الجهد البشري وثلث قوة الحيوانات). لكن هذا الاستثمار كان يستحق الجهد المبذول فقد فاق صافي عائدات الطاقة المستردة 50 (المربع 3-10).

لم تكن عائدات الطاقة من الطعام في المحاصيل الصينية التقليدية عالية حتى في ذروة أدائها في العقود الأولى من القرن العشرين. كان السبب الرئيس الحد الأدنى من ميكنة الزراعة وهذا يعني الاستمرار في سيطرة العمل البشري. وقد أتاح الكم

المربع 3-9

محتوى النيتروجين في المواد العضوية المعاد تدويرها في الصين

من المؤكد أن معدل إعادة التدوير التقليدي (وبالتالي معدلات الطاقة المخصصة لجمع الفضلات العضوية، ومعالجتها ورشها في الحقول) ضخم جداً لأن كمية النيتروجين في المواد العضوية المرشوشة في الحقل أو المحروثة في الأرض (كروث أخضر) ضئيلة. ففضلات الإنسان والحيوان تتألف في معظمها من الماء مثلها مثل الروث الأخضر. والكسبة (ما يتبقى بعد استخراج الزيت من البذور) غنية نسبياً بالنيتروجين. وللمقارنة فإن اليوريا، وهي في طليعة الأسمدة المركبة الحديثة، تحتوي على 46% من النيتروجين.

المواد	محتوى النيتروجين (% النيتروجين في الوزن الجديد)
روث الخنازير	0.6 -0.5
فضلات الإنسان	0.6 -0.5
روث أخضر (بيقة وفول)	0.3 -0.5
كسبة (فول الصويا، الفول السوداني، بذر اللفت)	7.0 -4.5
طين الأنهار والبحيرات	0.2 -0.1

المصدر: الأرقام من معلومات جمعها سميل (1983- 2001) ومذكورة في مختلف المصادر الصينية الحديثة والتاريخية.

الهائل من المعلومات الكمية حول سائر جوانب الزراعة الصينية التقليدية خلال عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين (بك 1930، 1937) وصف النظام بالتفصيل وإعداد تقارير دقيقة عن الطاقة. كانت غالبية الحقول صغيرة جداً (لا تزيد مساحتها على 0.4 هكتار) ولم تكن تبعد أكثر من خمس إلى عشر دقائق عن بيت المزرعة. وكان نصف أرض المزرعة تقريباً مروياً وربعها متدرجاً.

المربع 3- 10

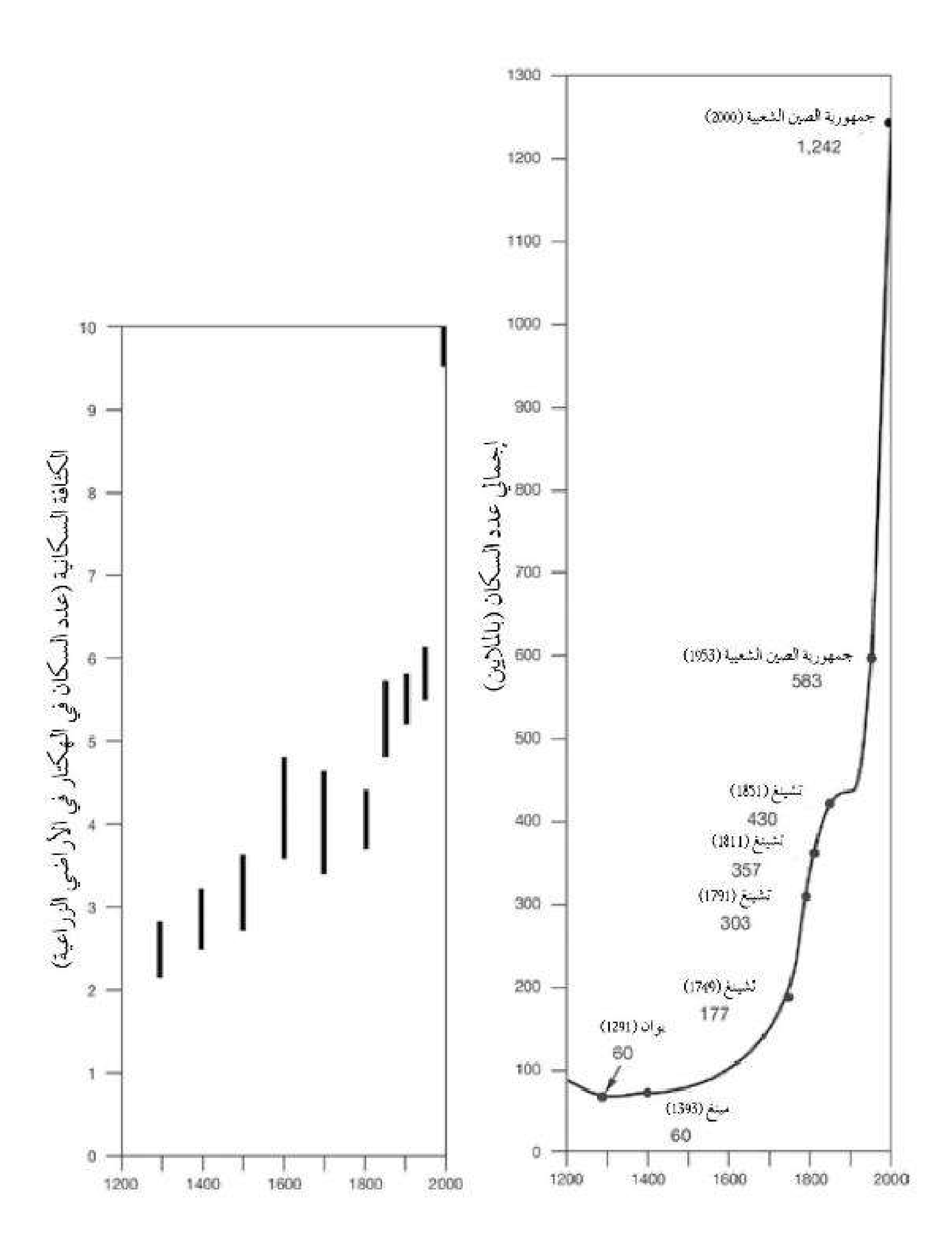
صافي عائدات الطاقة الخاصة بالتسميد

تطلَّب محصول جيد من القمح في أواخر الشتاء خلال حكم أسرة تشينغ يقدر بـ 1.5 طن/هكتار إلى أكثر من 300 ساعة عمل بشري و250 ساعة عمل حيواني. ويستحوذ التسميد على 17% و40% على التوالي من كمية العمل هذه. وأفترض بشيء من التحفظ أن 10 أطنان من السماد تنثر على مساحة هكتار واحد لا تحتوي على أكثر من 0.5% من النيتروجين (سميل 2001). وبعد تسربات لا مفر منها وخسائر بسبب البخر، لا يتبقى منها سوى النصف ليستفيد منه المحصول. وكل كيلوغرام من النيتروجين يعطي إنتاجاً إضافياً قدره 10 كغ من الحبوب. وبالمقارنة مع محصول غير مسمد هناك زيادة في المحصول قدرها 250 كغ على الأقل من الحبوب. ولا يستخدم من هذه الكمية أكثر من 3-4% من الحبوب علفاً للحيوانات. وبعد الطحن، يصل محصول الحبوب إلى 200 كغ من الدقيق على الأقل، أو نحو 2.8 جيغا جول من الطاقة الغذائية، بالمقارنة مع استثمار نحو 40 ميغا جول من الغذاء الإضافي للعمالة البشرية. أما صافي عائدات الطاقة الخاصة بالتسميد فهي نحو 70، وهذا معدل فائدة/كلفة يثير الإعجاب.

كان أكثر من 90% من الأراضي الزراعية يزرع بالحبوب، وأقل من 5% بالبطاطا السكرية، و2% بالألياف، و1% بالخضر، كما كان في ثلث المزارع الشمالية كلها ثور واحد على الأقل، وأقل من ثلث الملكيات الجنوبية جاموس ماء واحد. ومع أن المحاصيل كانت بحاجة إلى معظم الجر (90% للأرز، و70% للقمح) لكن العمل في الحقل الصيني، فيما عدا الحراثة والجر، والعزق، كان يعتمد اعتماداً شبه كامل على العمالة البشرية. ونادراً ما كانت الثيران وجواميس الماء تعلف بالحبوب، وبالتالي فإن من الممكن حساب عائدات الطاقة على أساس اليد العاملة البشرية وحسب. لم يكن القمح البعل الشمالي يعطي أكثر من 1 طن/هكتار، وكان إنتاجه يحتاج إلى أكثر من 600 ساعة من العمل، ومردوده بين 25 و30 وحدة طاقة غذائية في حبوب غير مطحونة لكل وحدة طاقة غذائية مطلوبة للعمل في الحقل ومعالجة المحصول.

حقق محصول الأرز المحلي والإقليمي إنتاجاً عالياً إبان حكم أسرة مينغ، حيث كان المعدل الوطني 2.5 طن/هكتار في العقود الأولى من القرن العشرين، وجاء ترتيبها بعد اليابان فقط. كان إنتاج مثل هذه الكمية بحاجة إلى 2.000 ساعة عمل، وهذا يعطي إجمالي عائدات أكثر بعشرين إلى خمسة وعشرين ضعفاً. أما إجمالي عائدات الطاقة بالنسبة إلى الذرة الصفراء فوصل إلى 40، لكن وجبة الذرة لم تكن طعاماً مفضلاً في الصين. أما بالنسبة إلى البقوليات (فول الصويا، والبازلاء، والفاصولياء) فلم تتجاوز عائداتها 15، بل كانت نحو 10 مثلها مثل عائدات زيوت النباتات التي تستخرج من بذور اللفت، والفول السوداني، والسمسم. استطاعت الحبوب أن توافر 90% من الطاقة الغذائية، أما استهلاك اللحوم لدى أسر الفلاحين فكان مهملاً (كان يقدم عادة في المناسبات فقط). لكن هذه الحمية الغذائية النباتية الرتيبة دعمت كثافات سكانية عالية.

لم تختلف كثافة السكان في الصين القديمة كثيراً عنها في مصر، إذ تراوحت بين 1 شخص/هكتار في الأقاليم الشمالية الفقيرة وأكثر من 2 شخص/هكتار في مناطق الأرز الجنوبية. كما كانت هناك فوارق بين الأقاليم حيث كان الشمال الشرقي خارج نطاق الهجرة الصينية خلال القرنين الأولين من فترة حكم أسرة تشينغ الخاضعة إلى منشو وكانت الكثافة السكانية متدنية في أجزاء من الجنوب الجبلي. ويلاحظ أن تكثيف الزراعة المتدرج ونظم الحمية الغذائية البسيطة دعمت في نهاية الأمر معدلات أعلى بكثير، فإعادة بناء تقريبية لأسرة مينغ (1368- 1644) وأسرة تشينغ (1644- 1911) تبدأ بنحو 2.8 شخص/هكتار من الأراضي الزراعية في 1400 وترتفع النسبة إلى 4.8 شخص/هكتار بحلول عام 1600 (بيركنز 1969). أما الهبوط الطفيف الذي شهدته فترة حكم قيان لونغ (1736- 1796) فهو نتيجة ازدياد عدد السكان وفتح أراضٍ زراعية جديدة. وقد استؤنفت الزيادة في الكثافة السكانية إبان القرن التاسع عشر، إذ تجاوز المعدل الوسطي 5 أشخاص/هكتار، وهذا أعلى من المعدل المعاصر لجاوة و40% فوق المعدل الوسطي على الأقل في الهند (الشكل 3- 12).



الكثافة السكانية (عدد السكان في الهكتار في الأراضي الزراعية)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
1200
1400
1600
1800
2000
إجمالي عدد السكان (بالملايين)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
جمهورية الصين الشعبية (2000)
1,242
جمهورية الصين الشعبية (1953)
583
تشينغ (1851)
430
تشينغ (1811)
357
تشينغ (1791)
303
تشينغ (1749)
177
يوان (1291)
60
مينغ (1393)
60
1200
1400
1600
1800
2000

الشكل 3-12

الكثافة السكانية في الصين من منظور طويل الأجل. سرعان ما طغى النمو السكاني المستمر في البلاد على التوسع الكبير في المساحة المزروعة خلال حكم أسرة تشينغ. وتبين أعمدة الكثافة عدم اليقين في التقديرات التاريخية. بناء على معلومات في بيركنز (1969) وسميل (2004).

تشير عمليات المسح التي أجراها بك (1937) في أوائل الثلاثينيات من القرن العشرين إلى معدل وطني لايقل عن 5.5 شخص/هكتار من الأراضي الزراعية. وهذا يماثل تقريباً المعدل في مصر المعاصرة، لكن الأرض في مصر كانت كلها مروية، كما كانت الأسمدة غير العضوية قيد الاستخدام الفعلي. وفي المقابل، كان معدل إنتاجية المحاصيل في جميع أنحاء الصين ينخفض تحت تأثير الزراعة في المناطق الجافة الشمالية. أما في إقليم الأرز الجنوبي فقد تجاوز المعدل 5 أشخاص/هكتار بحلول عام 1800، وقد دعمت أجزاء كبيرة منه أكثر من 7 أشخاص/هكتار بحلول أواخر العشرينيات من القرن العشرين. وبالمقارنة مع زراعة القمح في الأماكن الجافة، كانت عائدات الطاقة متدنية في زراعة الأرز المروية، لكن ذلك عودل بمحصول أكبر للهكتار، فبفضل مضاعفة المحصول من الأرز والقمح في أخصب الأراضي صار بالإمكان إطعام 12-15 شخصاً/هكتار.

ثقافات أمريكا الوسطى

في غياب حيوانات الجر، (وبالتالي غياب الحراثة) اختلفت الزراعة في أمريكا الوسطى الكلاسيكية اختلافاً كبيراً عن الزراعات في العالم القديم. لكنها أيضاً طورت طرائق للزراعة التكثيفية استطاعت أن تدعم كثافات سكانية عالية لدرجة تستحق الإعجاب، كما دجنت العديد من المحاصيل الغذائية التي تزرع الآن في جميع أنحاء العالم، وعلى رأسها الذرة الصفراء، والفلفل (*Capsicum annuum*) والطماطم (*Solanum lycopersicum*). أما أهم المحاصيل غير الغذائية التي نشأت في أمريكا الوسطى فهي القطن (*Gossypium barbadense*) حيث تبين التحاليل الجزيئية أن شبه جزيرة يوكاتان شهدت تدجين القطن الأصلي. أما أصول مجموعة المورثات الخاصة بأصناف القطن الحديثة فتعود إلى جنوب المكسيك وغواتيمالا (فندل وآخرون Wendel et al أ1999).

حققت أراضي المايا الاستوائية المنخفضة والأراضي المرتفعة الجافة من حوض المكسيك أكبر الإنجازات. وعلى الرغم من التفاعل الكبير بين شعبيْ هاتين المنطقتين، ومن كون الذرة الصفراء محصولهم الرئيس، إلا أن لكل منهما تاريخاً مختلفاً إلى حد كبير. فالأسباب التي أدت إلى انحدار الثقافة الأولى تظل محل جدال (هوغ وآخرون Haug et al. أ2003؛ ديمارست Demarset أ2004) في حين لقيت الثانية الدمار إثر الغزو الإسباني (ليون Leon أ1998). لكن مجتمع المايا ظل يتطور تدريجياً ولمدة طويلة قبل بداية العصر الكلاسيكي عام 300 م تقريباً. وقد احتضنت المنطقة التي تضم اليوم المكسيك (يوكاتان) وغواتيمالا وبيليز حضارة معقدة حتى عام

1000م. بعدئذ، وفي إحدى أشد المنعطفات غموضاً في تاريخ العالم، تفكك مجتمع المايا الكلاسيكي وتناقص عدد السكان من ثلاثة ملايين تقريباً في القرن الثامن م إلى 100.000 فقط حين وقع الغزو الإسباني (تيرنر Turner أ1990).

لقد قيل إن سوء الممارسة الزراعية - الحت الجائر وسوء استغلال المياه - كانت من أسباب سقوط المايا (جيل Gill أ2000). ففي باكورة تطورهم، كان المايا مزارعين متنقلين، لكنهم تحولوا تدريجياً إلى أشكال تكثيفية من الزراعة (تيرنر 1990). فسكان الأراضي المرتفعة من المايا بنوا مصاطب (مدرجات) ذات جدران صخرية قادرة على الاحتفاظ بالماء ومنع الحت الجائر على المنحدرات المزروعة باستمرار. أما سكان المناطق المنخفضة من المايا فبنوا شبكة قنوات تثير الإعجاب ورفعوا الحقول فوق مستوى سهول الفيضان لحماية الأرض من الفيضانات الموسمية. ويمكن رؤية حقول المايا القديمة المرتفعة، وبعضها يعود تاريخه إلى 1400 ق.م.، في الصور الجوية الحديثة. فالتعرف الواضح على هذه المعالم وتاريخها في السبعينيات يدحض المزاعم التي سادت مدة طويلة من الزمن بأن نشاط المايا اقتصر على الزراعة المتنقلة (هاريسون Harrison وتيرنر 1978).

أما حوض المكسيك فقد شهد سلسلة من الثقافات المعقدة بدءاً بشعب التيوتيهواكان Teotihuacanos أ(100 ق.م. - 850م) وبعدهم التولتك Toltecs أ(960- 1168) ثم الأزتك Aztecs في أوائل القرن الرابع عشر (تأسست تنوشتيتلان Tenochtitlan عام 1325). كانت هناك فترة انتقال طويلة من مرحلة جمع النباتات وصيد الغزلان إلى الزراعة الحضرية. وبدأ شعب التيوتيهواكان تكثيف الزراعة بتنظيم المياه في أوائل عهدهم، ثم تطور التنظيم بالتدريج حتى كان ثلث سكان المنطقة وقت الغزو الإسباني يعتمدون على تنظيم المياه للحصول على الغذاء (ساندرز Sanders، بارسونز Parsons، وستانلي Stanley أ1979).

استطاع الري الدائم باستخدام القنوات حول تيوتيهواكان أن يدعم 100.000 نسمة لكن أكثف الزراعات في أمريكا الوسطى اعتمدت على حقول التشينامبا Chinampas (بارسونز 1976) وهي حقول مستطيلة ترتفع بنحو 1.5 و1.8 م فوق مستوى المياه الضحلة لبحيرات تهكوكو Texcoco، وهالكو Xalco وهوشيميلكو Xochimilco. وقد استعمل في بناء هذه الحقول الطين، وبقايا المحاصيل، والأعشاب، والأعشاب المائية، وكانت تربتها الطينية الخصبة تزرع باستمرار، أو تعطى أشهراً قليلة من الراحة، كما كانت أطرافها تعزز بالأشجار. حولت حقول التشينامبا المستنقعات غير المنتجة إلى حقول وبساتين معطاء وحلت مشكلة احتفاظ التربة بالماء. وما سهل نقل المحاصيل إلى أسواق المدن إمكانية الوصول إليها بالقوارب. لقد كان مردود العمل المستثمر في حقول التشينامبا ضخماً. ويفسر معدل الفائدة/التكلفة تكرار الممارسة التي بدأت عام 100 ق.م. وبلغت ذروتها في العقود الأخيرة من حكم الأزتك (المربع 3-11).

حين وقع الغزو الإسباني، كان لبحيرات تهكوكو، وهالكو، وهوشيميلكو نحو 12.000 هكتار من حقول التشينامبا (ساندرز، بارسون، وستانلي 1979) احتاج بناؤها إلى ما لا يقل عن 70 مليون ساعة عمل. وكان على الفلاح المتوسط أن يشتغل مالا يقل عن 200 يوم في السنة لينتج من الطعام ما يكفي لإعالة أسرته، لذلك لم يكن باستطاعته أن يشتغل أكثر من 100 يوم في

مشروعات مائية ضخمة. وحيث إن قسطاً لا بأس به من هذا الوقت مخصص لصيانة الضفاف والقنوات الموجودة من قبل فقد وجب الاستعانة بعمل 60 وحتى 120 فلاحاً على الأقل لإضافة حقل تشينامبا

المربع 3-11

الحقول المرفوعة في حوض المكسيك

يمكن لحقل التشينامبا أن ينتج محصولاً يعادل أربعة أضعاف الأرض غير المروية. ومحصول ممتاز من الذرة الصفراء بمعدل 3 أطنان/هكتار يعطي، بعد طرح نحو العشر مقابل البذار والخسارة، نحو 30 جيغا جول من الطاقة الغذائية أكثر من قطعة أرض في منطقة جافة. كانت الحقول ترفع بعلو 1.5 م على الأقل فوق سطح الماء وهذا يعني أن بناء حقل تشينامبا مساحته 1 هكتار يحتاج إلى 15.000 م^3 من طمي البحيرة والطين. وبالمثل، فإن عاملاً يشتغل بين خمس وست ساعات يومياً لا يتمكن من إنهاء أكثر من 2.5 م^3. فرفع 1 هكتار من الحقول كان يتطلب 6.000 يوم عمل. وعلى اعتبار أن كلفة الطاقة الخاصة بالعمل هي 900 كيلو جول/سا، فإن المهمة تتطلب 30 جيغا جول من الطاقة الغذائية- وهذ كمية تكتسب في المحصول المحسن في سنة واحدة لا أكثر.

جديد واحد. كانت الوسائل مختلفة - لكن حوض المكسيك قبل الغزو الإسباني كان حضارة مائية لا تقل عن حضارة مينغ في الصين، الدولة الآسيوية العظيمة المعاصرة لها. كانت الجهود طويلة الأجل ذات التخطيط الجيد والتنسيق المركزي بالإضافة إلى قدر كبير من العمالة البشرية هي المكونات الرئيسة لنجاحها الزراعي.

فالذرة المروية تعطي غلة أعلى من القمح، كما أن الكثافات السكانية المدعومة بأفضل زراعات أمريكا الوسطى كانت عالية جداً. كان باستطاعة هكتار واحد من حقول التشينامبا أن يطعم 13-16 شخصاً تشكل الحبوب 80% من طاقتهم الغذائية. وبالطبع فإن المعدلات الخاصة بحوض المكسيك كله كانت أدنى بكثير إذ تتراوح بين أقل من 3 أشخاص/هكتار في المناطق المتطرفة ونحو 8 أشخاص/هكتار في الأراضي جيدة الري والصرف (ساندرز، بارسونز وسانتلي 1979). كان معدل الكثافة السكانية نحو 4 شخص/هكتار لسكان الحوض قبل الغزو (1519) البالغ عددهم مليون نسمة ممن يستخدمون كامل الأراضي الزراعية في الوادي، بالإضافة إلى كثافات سكانية مماثلة تقريباً تدعمها زراعة البطاطا في الحقول المرتفعة في الأراضي الرطبة حول بحيرة تيتيكاكا قلب منطقة الإنكا بين ما يشكل اليوم بيرو وبوليفيا (دينيفان Denevan أ1982؛ إريكسون Erickson أ1988).

في أوروبا، كما في الصين، كانت هناك فترات تقدم وئيدة نسبياً تخللتها فترات من الركود في الإنتاجية، وانتشرت المجاعات على نطاق واسع في أوقات السلم حتى القرن التاسع عشر. لكن مستوى الزراعة في أوروبا كان حتى القرن السابع عشر أدنى من المنجزات الصينية حيث كانت أوروبا تتبنى متأخرة الابتكارات القادمة من الشرق. أما الزراعة في اليونان، التي لا نعرف عنها سوى القليل، فلم تكن بالتأكيد محل إعجاب مثلها مثل أقرانها في بلدان الشرق الأوسط. لقد طور الرومان بالتدريج زراعة على مستوى متواضع من التعقيد لايزال وصفها موجوداً في أعمال كاتو (Cato De agri cultura)، وكولملا (De re rustica)، وفارو (Rerum rusticarum libri III) وبالاديوس (Opus agriculturae). وكثيراً ما أعيدت طباعة هذه المؤلفات - لعل أفضل مجلد يجمع هذه الأعمال مع التعليقات والهوامش هو ذلك الذي نشره غزنر Gesner أ(1735) - وكان له بالغ الأثر حتى القرن السابع عشر (وايت White أ1970؛ فوسل Fussell أ1972؛ برونر Brunner أ1995).

على النقيض من المناطق الداخلية ذات الكثافة السكانية العالية في الصين، حيث أعاقت قلة المراعي والكثافة السكانية العالية امتلاك قطعان الماشية على نطاق واسع، شكلت تربية الحيوانات على الدوام مكوناً قوياً من مكونات الزراعة الأوروبية. وقد شملت الزراعة الرومانية المختلطة دورات محاصيل الحبوب والبقوليات، وخلط الأسمدة العضوية، وحراثة البقوليات كسماد أخضر، كما كانت إعادة تدوير كل الفضلات العضوية الممكنة عملية مكثفة تتراوح بين زرق (مخلفات) الطيور عالي القيمة والكسبة. كان التكليس المتكرر[21] يفيد في تخفيض نسبة الحموضة في التربة، كما ترك ثلث الحقول على الأقل في وضع الراحة.

كانت الثيران، وغالباً ما تكون محدوة، حيوانات الجر الرئيسة؛ أما المحاريث فخشبية، والبذار يدوي، والحصاد يتم بالمنجل. أما حصادة غاليك Gallic، التي وصفها بليني Pliny وظهرت صورتها في بضعة منشورات مازالت باقية حتى اليوم، فكانت محدودة الاستعمال. والدرس كان يترك للحيوانات أو كان يتم بواسطة المدرس اليدوي. أما الغلال فكانت متدنية ومتأرجحة إلى حد كبير. وتشير إعادة بناء مدخلات زراعة القمح خلال القرون الأولى من الحقبة العامة إلى إنفاق ما بين 180 و250 ساعة من العمل الآدمي (ونحو 200 ساعة من عمل الحيوان) لإنتاج محاصيل أنموذجية تقارب 0.5 طن/هكتار. ومع ذلك، كان إجمالي عائدات الطاقة الغذائية، التي تتراوح بين 30 و40، عالياً جداً (المربع 3- 12).

تغيرت إنتاجية الزراعة الأوروبية ببطء شديد خلال الألفية الواقعة بين سقوط الإمبراطورية الرومانية الغربية وبدايات التوسع الأوروبي العظيم. ففي بواكير القرن الثالث عشر كان إنتاج القمح يتم بوسائل لم تتبدل عملياً، ولم يكن بإمكانه دعم كثافات سكانية أعلى مما كان عليه المعدل في مصر قبل عصر الأسَر. لكن العصور الوسطى لم تخلُ بالتأكيد من الابتكارات التقنية المهمة (زيبوم Seebohm أ1927؛ لايزرند Lizerand أ1942؛ سلايخر Slicher van Bath أ1963؛ ديوبي 1968، 1998؛ فسل Fussell أ1972؛ غريغ 1992؛ آستيل Astill

ولانغدون Langdon أ1997؛ أولسن Olsson وسفنسون Svensson أ2011). كان استعمال نير العنق على أحصنة الجر واحداً من أهم التغيرات.

ومع هذا النوع المطور من أطقم الخيل بدأت الأحصنة تحل محل الثيران بوصفها حيوانات الجر الرئيسة في كل المناطق الغنية من القارة. لكن الانتقال كان بطيئاً جداً، واستغرق تحقيقه قروناً عدة. ففي الأماكن الغنية من أوروبا حدث الانتقال بين القرن الحادي عشر، حيث أصبحت حدوة الحصان ونير العنق هي العرف السائد، وبين القرن السادس عشر. ويبين التقدم الموثق توثيقاً جيداً أن الأحصنة شكلت 5% فقط من مجموع حيوانات الجر في الأراضي وقت إحصاء كتاب يوم الحساب Domesday

المربع 3-12

متطلبات محاصيل القمح الأوروبي من العمالة 200- 1800

ساعات العمل (عمال / حيوانات)/هكتار قمح

المهمات	إيطاليا	إنجلترا	هولندا
	200	1200	1800
الحراثة			
ثيران	74 /37	150 /25	
أحصنة			30 /15
تسوية	16 /8	14 /7	10 /5
بذار			

بذار باليد	--/4	--/4		
مثقب البذار				6 /3
تسميد				60 /40
حصاد				
منجل	--/50	--/50		
مهاد				--/24
نقل	30 /15	20 /10		14 /7
درس				
دعس (ثيران)	60 /30			
درس يدوي		--/30		--/33
تذرية	--/25	--/25		--/30
كيل، تكييس	--/8	--/7		--/10

المصادر: الأرقام مبنية على معلومات وردت في بارز Baars أ(1973)، سببوم (1927)، وايت (1970) ستانهيل Stanhill أ(1976) ولانغدون (1986).

count أ(1086) ونحو 35% من أراضي الفلاحين (لانغدون Langdon أأ1986). وبحلول عام 1300 ارتفعت هذه الحصص إلى 20% و45% على التوالي إثر فترة ركود، ولم تشكل الأحصنة أغلبية حيوانات الجر إلا بنهاية القرن السادس عشر.

تبين الوفرة النسبية في المعلومات الإنجليزية مدى تعقيد هذا الانتقال، ولطالما حلت الخيل محل الثيران في ضبط الخطوة في الأطقم المختلطة إذ كان لتبنيها نمط إقليمي واضح (كانت أنجليا الشرقية متقدمة على بقية مناطق إنجلترا) كما كان صغار ملاك الأراضي السباقين لاستعمالها في مزارعهم. إلا أن اختلاف نوع التربة (الطين يلائم الثيران) وتوافر العلف (المراعي الكثيفة تلائم الثيران) وسهولة الوصول إلى الأسواق لشراء حيوان عمل جيد وبيع اللحوم (القرب من المدن يلائم الخيل) تضافرت لإعطاء إنتاج معقد. وتشمل عوامل التعويض النزعة المحافظة، ومقاومة التغيير، والكفاح لتخفيض كلفة التشغيل، وروح الريادة. كما أعاق عمليةَ التغيير سوء تصميم المحاريث وضعف أغلبية الخيل في العصور الوسطى.

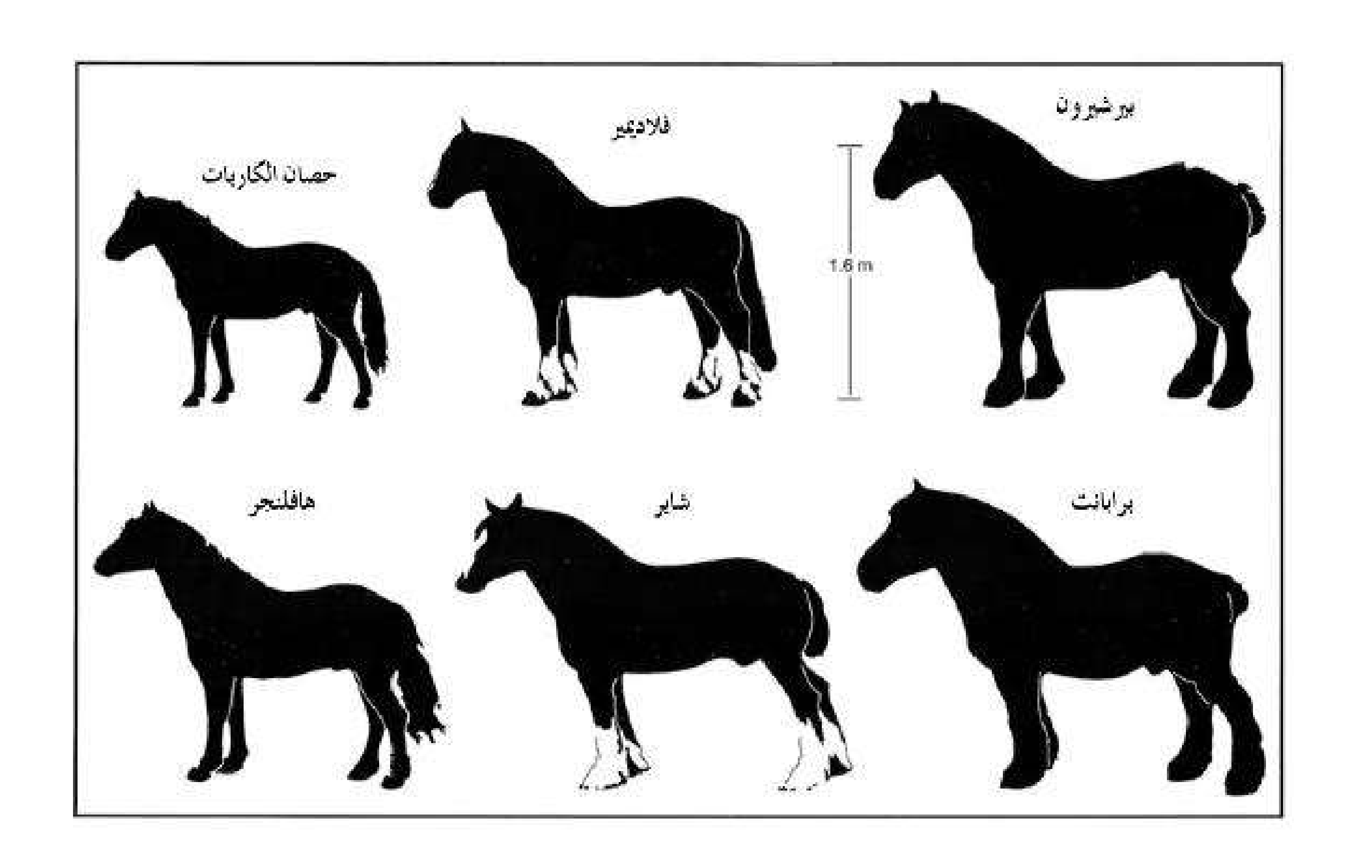
أدى اجتماع النعال الخشبية العريضة، والعجلات الخشبية الثقيلة، وألواح الدجر الخشبية الضخمة إلى قدر هائل من الاحتكاك. لذا لم يكن غريباً في التربة الندية استعمال أربعة حيوانات إلى ستة، سواء أكانت ثيراناً أو خيلاً للتغلب على هذه المقاومة. وبالرغم من قلة كفاءتها النسبية، شكلت مجموعة محاريث الدجر وأطقم الحيوانات الضخمة (بما فيها الأحصنة)، أساساً في توسعة الأرض تحت الزراعة. وبتقسيم الأرض إلى أراضٍ مرتفعة وأثلام غائرة، أحدثت حراثة الدجر أنموذج صرف اصطناعياً فعالاً. صحيح أن طريقة التحكم بالماء الزائد في الحقل لم تكن فعالة مثل حقول التشينامبا بكل تأكيد، لكنها اكتسبت آثاراً تاريخية ومكانية أوسع. لقد فتحت حراثة الدجر السهول الفسيحة المغمورة بالمياه في شمالي أوروبا لزراعة القمح والشعير، وهما المحصولان اللذان ينتميان في الأساس إلى بيئة الشرق الأوسط الجافة.

في أواخر العصور الوسطى شكلت حدود مستوطنة ألمانيا المدى الأقصى لحراثة الدجر شرقاً. شملت التقنية الأراضي المنبسطة الأوروبية بين بحر الشمال والأورال في القرن التاسع عشر، لكنها بقيت غائبة حتى ذلك الحين في معظم بلاد البلقان. ومن الواضح أن استخدامها كان تغيراً ثورياً يؤكد التقدم الزراعي في شمال غرب أوروبا ووسطها وفي البلاد الواقعة على بحر البلطيق ومكوناً رئيساً للرفاهية الزراعية المستمرة للأراضي المنخفضة الرطبة والباردة. كانت أحصنة الجر الثقيلة، المألوفة في مزارع أوروبا وطرقاتها في القرن التاسع عشر، نتاج قرون عدة من الاستيلاد (فيليه Villiers أ1976) لكن التقدم كان بطيئاً، ولم تكن أحصنة القرون الوسطى أكبر حجماً من أجدادها الرومانية (لانغدون 1986). وحتى في أثناء العصور الوسطى لم تكن أغلبية الحيوانات أعلى من 13- 14 كفاً، ولم تأخذ قوة حصان الجر بالتزايد بشكل ملحوظ إلا بعد انتشار حيوانات ارتفاعها 16- 17 كفاً ووزنها 1 طن تقريباً في أوروبا الغربية خلال القرن السابع عشر (الشكل 3-13).

وهذا يفسر الشكاوى الإنجليزية في العصور الوسطى من كون الأحصنة عديمة الفائدة في التربة الطينية. وعلى النقيض من ذلك، كانت أحصنة الجر الثقيلة في القرن التاسع عشر رائعة في الأراضي الرطبة، والتربة الثقيلة، والأراضي الوعرة. وخلال القرن التاسع عشر، كان باستطاعة

زوجين من الأحصنة الجيدة إنجاز 25- 30% من العمل في اليوم أكثر من طقم من أربعة ثيران. وقد نتجت عن هذه السرعة ثلاثة مكاسب تكثيفية: زيادة تكرار زراعة الحقول الموجودة (لاسيما حراثة الأراضي المراحة للتخلص من الأعشاب الطفيلية)، توسعة الزراعة في أرض جديدة، وتحرير كمية من العمل للاستفادة منها في الحقول الأخرى أو في نشاطات في باحات المزارع. وبفضل الدورات الزراعية صار بالإمكان توفير علف مركز يكفي لطقم من حصانين أغلبية المناطق الأوروبية، وهذا أرخص من الإنفاق على أربعة ثيران. لكن بطء الانتقال من الثيران إلى الأحصنة، والتذبذب الكبير في إنتاج المزارع بين منطقة وأخرى، وانخفاض محاصيل الحبوب الرئيسة انخفاضاً كبيراً جعل من المستحيل عزو إنتاجية ثابتة التطور إلى تزايد أعداد أحصنة الجر.

ولم يظهر تفوق الخيل إلا حين شكلت الحيوانات القوية أغلبية حيوانات الجر وبدأت تسهم في أعمال الزراعة التكثيفية خلال القرنين السابع عشر والثامن عشر. أما فيما يخص النقل البري فإن ميزاتها عرفت قبل ذلك بكثير. من ناحية أخرى،



الشكل 3- 13

تراوحت أحصنة الجر الأوروبية بين حيوانات صغيرة تشبه الأمهر ارتفاعها أقل من 12 كفاً (1.2 م) وحيوانات ثقيلة طولها (أكثر من 16 كفاً) (ووزنها 1 طن تقريباً). وقد عدلت أحجام صور الحيوانات الظِلِّية والمستقاة من سيلفر (1976).

شكلت أحصنة العمل تحدياً كبيراً في مجال الطاقة إذ كان من الضروري توفير الطاقة للحصول على العمل الشاق الممكن من خلال تكدين الأحصنة وشدها إلى النير وحدوها وذلك من خلال تحسين نوعية العلف وعدم الاكتفاء بالأعشاب والتبن الذي يكفي البقر. فالأحصنة العاملة القوية تحتاج إلى علف مركز وحبوب بقولية أو غير بقولية. ونتيجة لذلك كان على المزارعين مضاعفة محاصيلهم لتوفير الغذاء لأسرهم والعلف لحيواناتهم. وقد ولدت الزراعة التكثيفية في المناطق قليلة الكثافة السكانية التي لا تستطيع توليدها من دون الحاجة إلى علف الحيوانات.

تتيح لنا وفرة أرقام الأسعار التاريخية إعادة بناء اتجاهات الإنتاج طويلة الأجل في عدد من البلدان (إيبل Able أ1962). وبالطبع، كانت هناك فوارق إقليمية كبيرة، لكن التذبذبات الدورية الكبيرة لا تفوت على أحد. تميزت أيام الرفاهية (وبالأخص 1150-1300، القرن السادس عشر، و1750-1800) بعمليات تحويل كثيفة للسبخات والغابات إلى حقول. كما ولدت استعمار المناطق النائية وجلبت أصنافاً عديدة من الغذاء مكملة للخبز، وهي المحاصيل الرئيسة المنتشرة. لكن التراجع الاقتصادي الحاد والحروب أدت إلى انتشار المجاعات وإلحاق خسائر جسيمة بالسكان والتخلي عن الحقول والقرى (مركز البحوث التاريخية 1965؛ بيريزفورد Beresford وهيرست Hurst أ1971). فالأوبئة والحروب ألحقت خسائر فادحة في السكان في القرن الرابع عشر. وفي العقود الأولى من القرن الخامس عشر تراجع عدد سكان أوروبا بنسبة الثلث عما كان عليه في 1300 كما خسرت ألمانيا نحو خُمسي فلاحيها بين 1618 و1648.

ظل غياب الأمان الصفة الملازمة للزراعة الأوروبية حتى نهاية القرن الثامن عشر، وبدا حال الفلاحين مزرياً خلال العقود الأولى من القرن التاسع عشر حتى في الأجزاء الموسرة من أوروبا. وقد عبر كوبيت Cobbett أ(1824، 111) في أثناء سفره عبر فرنسا في عام 1823 عن صدمته لرؤية «النساء وهن ينثرن الروث بأيديهن!» كما ذكر أن أدوات الزراعة المستخدمة في الحقول الفرنسية «بدت وكأنها التي كانت تستخدم في إنجلترا قبل سنوات عدة، وربما قبل قرن من الزمان». لكن بعد ذلك بفترة قصيرة، أصبحت الزراعة التكثيفية أخيراً هي العرف السائد في معظم أوروبا الأطلسية.

كانت أبرز سماتها التخلي تدريجياً عن إراحة الأرض، وتبني دورات زراعية قياسية متعددة. توسعت زراعة البطاطا بعد عام 1770، وامتد إنتاج الماشية وانتظم التسميد الثقيل. وفي القرن الثامن عشر، وصل معدل التسميد السنوي في فلاندرز باستخدام روث الحيوانات وفضلات البشر والكسبة والرماد إلى 10 أطنان/هكتار (سيلخر فان باث 1963). وبرزت هولندا كرائدة في إنتاج المحاصيل. في نحو عام 1800 أنتجت المزارع الهولندية القمح كمحصول غذائي رئيس، بالإضافة إلى الشعير، والشوفان، والجاودار والفول، والبازلاء، والبطاطا، وبذر اللفت، والبرسيم،

والعلف الأخضر. وكانت نسبة الأرض المراحة أقل من 10%، كما كان هناك تكامل وثيق مع إنتاج الماشية (بارز 1973).

لم تتغير كثيراً ساعات العمل المطلوبة لزراعة هكتار من القمح الهولندي مقارنة بالممارسات الرومانية أو ممارسات العصور الوسطى، وحين حلت الخيل القوية محل الثيران قلّت ساعات الجر، لكن اجتماع الأصناف المحسنة والتسميد المكثف أدى إلى إنتاج غلال تفوق غلال العصور الوسطى بأربع مرات. ونتيجة لذلك، ارتفع صافي عائدات الطاقة للزراعة الهولندية في أوائل القرن التاسع عشر 160 مرة تقريباً مقارنة بكسب يقل عن 40 مرة في زراعة القمح الإنجليزي في العصور الوسطى، ومردود يقل بنحو 25 مرة عن عائدات زراعة القمح الروماني في إيطاليا في عام 200 م (المربع 3-13).

استمر تكثيف الزراعة في معظم البلدان الأوروبية بعد انقضاء كساد نتج عن تضخم الإنتاج تضخماً كبيراً في أوائل القرن التاسع عشر. وثمة مثالان من ألمانيا يشرحان هذه التبدلات (أبيل 1962). في عام 1800 كان ربع الحقول الألمانية في حالة الراحة، لكن هذه النسبة انخفضت إلى من دون 10% في عام 1883. وكان المعدل السنوي لاستهلاك الفرد من اللحوم قبل عام 1820 أقل من 20 كغ، لكنه ارتفع إلى 50 كغ تقريباً بنهاية القرن. كما استُعيض عن الدورات الزراعية الثلاثية بسلاسل منوعة رباعية المحصول. وفي دورة نورفوك الشائعة كان اللفت والشعير والبرسيم محاصيل تتبع القمح، كما كانت الدورات السداسية آخذة في الانتشار أيضاً، وشاع رش سلفات الكالسيوم والمرل أو الكلس لتعديل حموضة التربة الزائدة في المناطق الغنية.

شهد القرن التاسع عشر أيضاً تسارع استخدام معدات أفضل، واستخدام أعداد متزايدة من حيوانات الجر: بين 1815 و1913 ارتفع إجمالي عدد الأحصنة والثيران والحمير (بالأحصنة المكافئة) بنسبة 15% في المملكة المتحدة، و27% في هولندا، و57%

المربع 3-13

تكاليف الطاقة وعائداتها الخاصة بمحاصيل القمح الأوروبي 200-1800

تكاليف الطاقة وعائداتها الخاصة بمحاصيل القمح

إيطاليا	إنجلترا	هولندا

	200	1200	1800
ساعات العمل	177	158	167
كلفة الطاقة ميغا جول	142	126	134
محصول الحبوب (طن/هكتار)	0.4	0.5	2.0
محاصيل غذائية (جيغا جول)	3.3	4.9	22.2
صافي عائدات الطاقة	23	39	166
ساعات عمل الحيوانات	180	184	120

المصادر: الأرقام مبنية على معلومات في سيبوم (1927)، وايت)1970) بارز (1973) ستانهيل (1976) لانغدون (1986) وريغلي (2006).

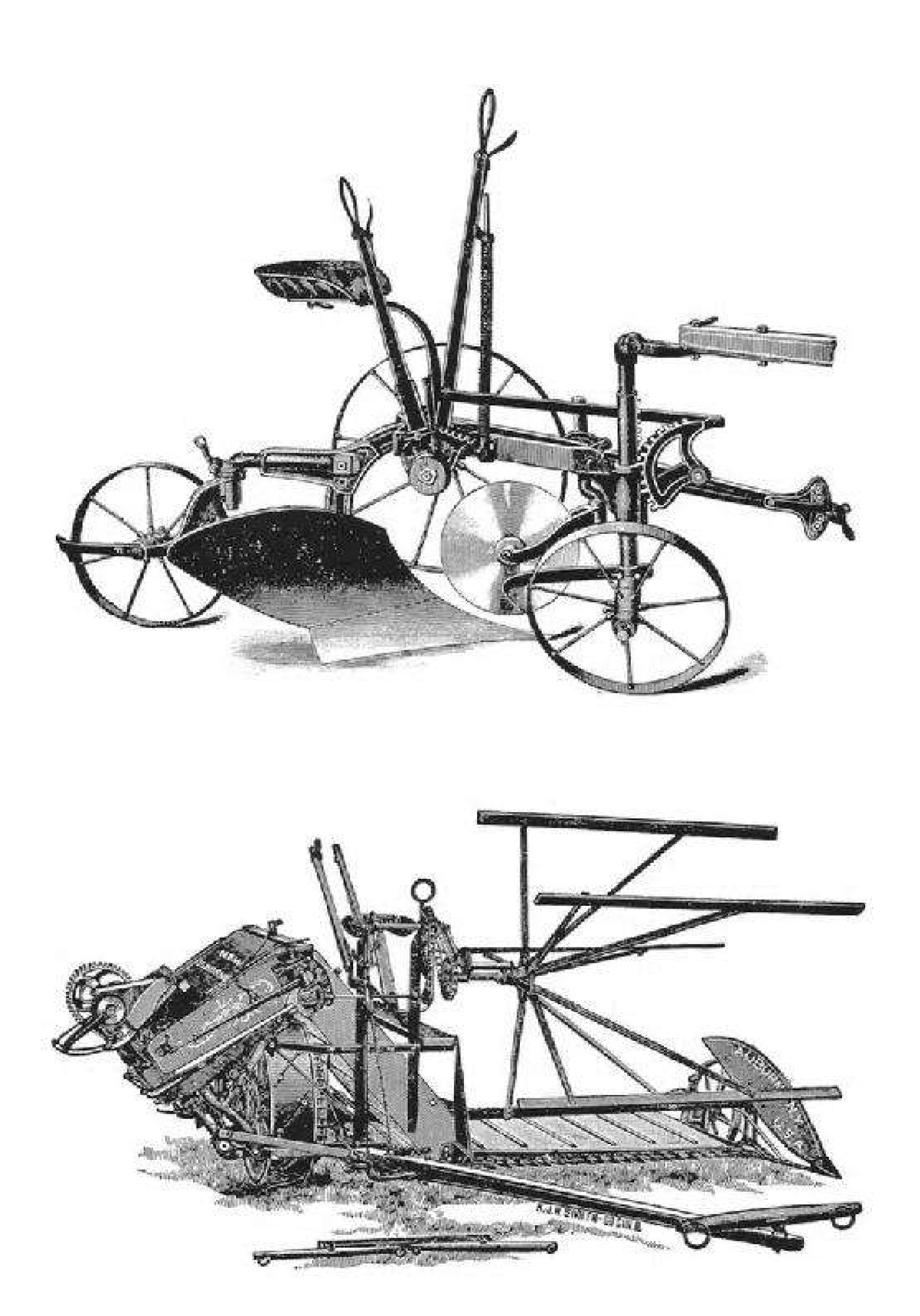
في ألمانيا (كندر Kander ووردة Warde أ2011). وبحلول 1850 كانت المحاصيل ترتفع في كل إقليم زراعي مهم على اعتبار أن الزراعة الآخذة في التكثيف كانت قادرة على توفير الغذاء لأعداد متنامية من سكان المدن. بعد قرون من التذبذب، وصلت الكثافات السكانية في أكثر المناطق الزراعية تكثيفاً - هولندا، وأجزاء من ألمانيا، وفرنسا وإنجلترا - إلى 7-10 أفراد/هكتار من الأراضي الزراعية بنهاية عام 1900. وعكست هذه المستويات دعماً كبيراً من الطاقة أتى مباشرة من خلال الآلات والأسمدة المنتجة مع الفحم. وأصبحت الزراعة الأوروبية في أواخر القرن التاسع عشر نظاماً هجيناً من الطاقة: صحيح أنه ظل معتمداً على الطاقة الحيوية في عملية التحريك، لكنه كان يستفيد أكثر فأكثر من دخول الطاقة الأحفورية بأشكالها المتعددة.

أمريكا الشمالية

إن تاريخ الزراعة الأمريكية في مرحلة ما بعد الثورة تاريخ رائع بسبب تسارع الابتكارات وعلو وتيرتها. هذه التغيرات أدت إلى أعلى زراعات العالم مردوداً بنهاية القرن التاسع عشر (أندريه Andrey أ1894؛ روجين Rogin أ1931؛ شليبكر Schlebecker أ1975؛ كوتشراين Cochrane أ1993؛ هارت Hart أ2004؛ مندلاك Mundlak أ2005). خلال العقود الأخيرة من القرن الثامن عشر كانت الزراعة في الولايات الشمالية الشرقية، وفي الولايات الجنوبية بنحو خاص، متخلفة عن أوروبا. كانت العيدان (المحاريث الخشبية) ذات السكة المصنوعة من الحديد الصب والدجر الخشبية المغطاة بقطع معدنية ضعيفة تسبب احتكاكاً هائلاً، وانسداداً ثقيلاً، وضغطاً على عنق الثيران، مثلما كان البذار يدوياً، والحصاد بالمنجل، والدرس بالمدرس اليدوي لكنه في الجنوب كان يجري بطريقة بدائية تعتمد على دعس الحيوانات على المحصول.

كل هذا تغير بسرعة خلال القرن الجديد. وأول ما تغير هو الحراثة (أندريه 1894؛ روجين 1931). أدخل تشارلز نيوبولد Charles Neubold محراث الحديد الصب عام 1797؛ ثم جعلت براءات اختراع جيثرو وود Jethro Wood أ(1814 و1819) النسخة التبادلية عملية. وفي أوائل الثلاثينيات بدأت المحاريث الفولاذية تحل محل محاريث الحديد الصب. في عام 1833 صنع جون لاين John Lane أول محراث من فولاذ شفرات المناشير، وتولى جون دير John Deere تسويقه تجارياً حيث كان إعلانه الأصلي (1843) عن الدجر المصنوع من الحديد الصب يعد بأن المعدن المصقول «يشق أي نوع من التربة بسهولة، ولا يعلق في أصعب الأراضي الوعرة» (ماجي Magee أ2005).

وبفضل رخص الفولاذ المنتج في محول بسمر صار الدجر في متناول الجميع، وأدخل لاين محراثه بطبقاته الفولاذية في عام 1868. وفي الستينيات من القرن التاسع عشر شاع استعمال المحاريث الآلية ثنائية وثلاثية العجلات (الشكل 3- 14). كما



الشكل 3-14

محراث ركوب ثلاثي العجلات (من صنع دير وشركاه Deere & Co. في مولين، إلينوي، خلال الثمانينيات من القرن التاسع عشر) والحصادة - الحزامة (صنعت في العقود الأخيرة من القرن التاسع عشر في أوبرن، نيويورك). هذان الاختراعان فتحا السهول الأمريكية لزراعة الحبوب على نطاق واسع. مقتبس من آردري (1894).

استخدمت محاريث فيها عشر شفرات حراثة فولاذية يجرها اثنا عشر حصاناً قبل نهاية القرن لفتح أراضٍ زراعية جديدة في ولايات السهول الشمالية وأقاليم البراري الكندية في مانيتوبا، وساشكاتشوان، وألبرتا. وبفضل المحاريث المزودة بالدجر الفولاذية الضخمة أصبح بالإمكان شق الأراضي المكسوة بالأعشاب الكثيفة وفتح سهول أمريكا الشمالية الشاسعة أمام زراعة الحبوب.

واكب التقدم في الحراثة ابتكارات أخرى. فبحلول عام 1850 كانت مثاقب البذار والدرّاسات التي تجرها الأحصنة تستخدم على نطاق واسع. وقد سجلت براءة اختراع أول حصادة قمح آلية في إنجلترا بين عامي 1799 و1822، وقد بنى اثنان من المخترعين الأمريكيين، وهما سايروس ماكورميك Cyrus McCormick وأوبد هوسي Obed Hussey على هذا الأساس وطورا آلات عملية أنتجت بالجملة بدءاً من ثلاثينيات القرن التاسع عشر (غرينو Greeno أ1912؛ ألدرخ Aldrich أ2002). وراجت مبيعات الاثنين خلال الخمسينيات من القرن التاسع عشر، حتى صار 250.000 منها قيد الاستخدام بنهاية الحرب الأهلية. ومنحت براءة اختراع أول حصادة عام 1858 إلى سي دبليو مارش ودبليو دبليو مارش، حيث كان الرجلان يحزمان السنابل المقطوعة في رزم، وأدخل جون أبلبي John Appleby أول حزّامة ناجحة عام 1978.

كان هذا الاختراع آخر المكونات المطلوبة من أجل الحصادة الآلية الكاملة التي كانت تطرح رزم الحبوب جاهزة للتجميع (الشكل 3- 14). بالإضافة إلى الحراثة الآلية متعددة السكك كان من نتائج الانتشار السريع لهذه الآلات قبل نهاية القرن التاسع عشر أن فتحت مساحات شاسعة من الأراضي العشبية لا في أمريكا الشمالية وحسب، بل في الأرجنتين وأستراليا أيضاً. لكن أداء أفضل أنواع الحصادات -الحزامات سرعان ما تفوق عليها إدخال أول آلة حصادة- درّاسة تجرها الخيل والتي سوقتها شركة كاليفورنيا ستوكتون وركس في ثمانينيات القرن التاسع عشر. كما استطاعت آلات الهاوزر Houser وهي الحصادات - الدرّاسات القياسية لدى الشركة، أن تحصد ثلثي قمح كاليفورنيا في عام 1900 حين كانت 500 آلة على الأقل تعمل في حقول الولاية (كورنوايز Cornways أ2015).

أما الآلات الضخمة فكانت بحاجة إلى 40 حصاناً، واستطاعت أن تحصد هكتاراً من القمح في أقل من 40 دقيقة - لكنها كانت تشغل الآلات التي تجرها الحيوانات بطاقتها القصوى بسبب صعوبة تطقيم 40 حصاناً وتوجيهها. لكن نشرها كان أفضل دليل على انتقال العمل الذي حدث في زراعة أمريكا التقليدية في القرن التاسع عشر. في بدايتها، كان الفلاح (80 واط) الذي يعمل في الحقل يتلقى العون من نحو 800 واط من قوة الجر (ثورين)؛ وفي نهايتها صار تحت تصرف الفلاح الذي يجمع حقل قمحه في كاليفورنيا 1.800 واط (طقم من 30 حصاناً) بعد أن أصبح المتحكم بتدفق الطاقة ولم يعد مشغل العمل الذي لا غنى عنه في المزرعة.

في عام 1800 كان فلاحو نيو إنجلاند (الذين يبذرون باليد، وبعيدان (محاريث خشبية) تجرها الخيل، ومسحاة ذات فرشاة لتسوية التربة، ومنجل، ودرّاسة يدوية) يحتاجون إلى 150- 170 ساعة عمل لإنتاج محصولهم. وفي كاليفورنيا عام 1900، وبفضل الحراثة متعددة الخطوط، وتفتيت التربة بالأمشاط المسننة، والحصاد وإعداد الرزم معاً بات بالإمكان إنتاج كمية القمح ذاتها في أقل من تسع ساعات (المربع 3- 14). في عام 1800 احتاج المزارعون في نيو إنجلاند أكثر من سبع دقائق لإنتاج

المربع 3- 14

متطلبات العمالة (إنسان/حيوان) مقدرة بالساعة/هكتار وكلفة الطاقة الخاصة بالقمح الأمريكي 1800- 1900

المهمات	1800	1850	1875	1900
الحراثة				
المحراث الخشبي	20/ 40			
محراث الحديد الصب		15/ 30		
المحراث الفولاذي			8/ 24	

المحراث الفولاذي				
متعدد السكك				30 /3
تنعيم التربة				
تنعيم بالفرشاة	14 /7			
تنعيم بالمشط		10 /5	15 /5	4 / 1
البذار				
نثر يدوي	--/3			
بذار بالثقوب		6 /3	9 /3	2 / 1
الحصاد				
المنجل	--/49			
السرير		--/25		
الرابط			6 /11	
الحصادة - الدراسة				17 /3

النقل	10 /10	8 /8	5 /5	10 /2
الدراسة	10 /10	8 /8		
التذرية	--/40			
ساعات العمل	162	66	40	9
كلفة الطاقة (ميغا جول)	145	56	32	7
إجمالي عائدات				
الطاقة الغذائية	129	335	586	2680
صافي عائدات				
الطاقة الغذائية	90	270	500	2400
إنتاجية العمل (د/كغ من الحبوب)	7.2	2.9	1.8	0.4

إن أول حالة ممثلة (1800) هي زراعة نيو إنجلاند الأنموذجية حيث كان ثوران ورجل إلى أربعة رجال يوفرون الطاقة لجميع المهام. والسلسلة الثانية (1850) تتتبع الدخل في الزراعة في أوهايو التي كانت تعتمد على الخيل في منتصف القرن. أما الثالثة (1875) فتبين مزيداً من التطورات في إلينوي؛ كما يبين التقرير الأخير (1900) أكثر أشكال زراعة القمح في كاليفورنيا إنتاجية بالاعتماد على قوة الخيل. والأرقام في الجدول تبين إجمالي الساعات (رجال/حيوانات) التي أنفقت في زراعة كل هكتار من القمح. وبما أن محصول أمريكا من القمح لم يبد أي تقدم في القرن التاسع عشر، فإنني أفترض محصولاً ثابتاً من 20 كيساً/ فدان أو 1.350 كغ/هكتار

(18.75 جيغا جول/هكتار). الحسابات مبنية إلى حد كبير على معدلات الأداء التي حصل عليها روجين (1931).

كيلوغرام واحد من القمح، ولكن أقل من نصف دقيقة في الوادي الأوسط في كاليفورنيا عام 1900، أي ما يعادل 20 ضعفاً تقريباً من كسب إنتاجية العمل في قرن كامل.

أما فيما يتعلق بصافي مصروف الطاقة فقد كانت هذه الفوارق أكبر نوعاً ما: كان الجزء الأعظم من ساعات العمل عام 1800 ينفق في أعمال أشق ما هو في العقود التالية في استخدام المحاريث، والمحشات، والدرّاسات اليدوية، كما انخفضت الخسائر الناجمة عن البذار والتخزين انخفاضاً كبيراً. وبالمقارنة مع عام 1800، كانت كل واحدة من الطاقة الغذائية المطلوبة للعمل في المزرعة تنتج وسطياً نحو 25 ضعفاً من الطاقة الغذائية من القمح في عام 1900. وتعود هذه التطورات جزئياً بالطبع إلى زيادة المردود زيادة كبيرة بسبب استعمال آلات أفضل. أما السبب الآخر وراء سرعة ارتفاع عائدات الطاقة من العمالة الآدمية فكان إحلال قوة الأحصنة محل القوة العضلية الآدمية. فقد أنتج المخترعون الأمريكيون طائفة واسعة من المعدات والآلات، لكنهم لم يحققوا سوى نجاح محدود في مجال استبعاد الحيوانات بوصفها مصدر القوة المحركة في الزراعة.

كانت دراسة المحاصيل العملية الرئيسة الوحيدة التي حلت فيها المحركات البخارية تدريجياً محل الخيل. وتوجب على الزراعة الأمريكية المتوسعة الاعتماد على أعداد متنامية من الخيل والبغال. كانت هذه الحيوانات قوية البدن، ضخمة البنية وجيدة الغذاء بصفة عامة - لكن كلفة طاقتها كانت باهظة. وبحلول عام 1900 كانت الحيوانات بحاجة إلى زيادة من الطاقة في علفها بنسبة 50% أكثر من ثيران نيو إنجلاند في عام 1800، ولم تكن تكتفي بالتبن أو القش، بل كانت بحاجة إلى الشوفان أو الذرة أيضاً حتى إن زراعة هذا العلف خفضت إنتاج محاصيل البشر، ومن الممكن حساب هذه التكاليف حساباً دقيقاً إلى حد كبير (وزارة الزراعة الأمريكية 1959). وخلال العقدين الأولين من القرن العشرين، بقيت أعداد الخيل والبغال الأمريكية في حدود 25 مليوناً. وتطلبت زراعة ما يكفي من العلف لغذائها وعملها نحو

المربع 3- 15

علف خيل الجر الأمريكية

في عام 1910 كان في أمريكا 24.2 مليون من البغال وخيل المزارع (ولم يكن فيها سوى 1.000 من الجرارات الصغيرة). في عام 1918 وصل عدد حيوانات الجر إلى 26.7 مليون وارتفع عدد الجرارات إلى 85.000 (مكتب الإحصاء الأمريكي USBC أ1975). وعلى اعتبار أن الحيوانات العاملة تستهلك من علف الحبوب 4 كغ يومياً، بينما تستهلك الحيوانات

الأخرى 2 كغ من العلف (بايلي Bailey أ1908) وعليه فإن الحاجة السنوية من العلف هي 30 طناً مترياً من الشوفان والذرة. وإذا كان محصول الحبوب نحو 1.5 طن/هكتار لتطلب الأمر زراعة 20 ألف هكتار Mha على الأقل بحبوب الأعلاف. ولتوفير العلف من التبن والقش، كانت الخيل بحاجة إلى 4 كغ في اليوم من التبن، في حين تكتفي بقية الحيوانات بنحو 2.5 كغ في اليوم، أي إنها تحتاج إلى ما مجموعه 30 طناً مترياً من التبن سنوياً. فإذا كان محصول التبن يبلغ 3 أطنان/هكتار، وجب حصاد 10 آلاف هكتار من التبن على الأقل. أما الأرض المخصصة لعلف الخيل، فيجب ألا تقل مساحتها عن 30 ألف هكتار، مقارنة بنحو 125 ألف هكتار من الأرض التي تحصد سنوياً، وهذا معناه أن قطعان الخيل في المزارع الأمريكية (من الحيوانات العاملة وغير العاملة) كانت بحاجة إلى 25% من أراضي البلاد الزراعية. وقد أصدرت وزارة الزراعة الأمريكية (1959) إحصاءات مماثلة تقريباً بإجمالي قدره 29.1 ألف هكتار.

ربع الأراضي الزراعية الأمريكية (المربع 3-15). ولولا مساحة الأراضي الزراعية الكبيرة في أمريكا لما كان بالإمكان إفراد هذه المساحة الهائلة. في عام 1910 كان في البلاد 1.5 هكتار/ للفرد وهذا يشكل ضعفي المساحة في عام 1990 ونحو عشرة أضعاف المساحة في الصين المعاصرة.

في العقود الأخيرة من القرن التاسع عشر لم يكن اجتماع التصاميم الذكية وغزارة قوى الخيل التي جعلت الزراعة الأمريكية غزيرة الإنتاج. ففي الثمانينيات من القرن التاسع عشر، استهلكت أمريكا من الفحم أكثر ما استهلكت من الخشب، كما أخذ النفط الخام يكتسب أهمية. وصار إنتاج الأدوات، والمعدات والآلات وتوزيعها، وكذلك شحن المنتجات الزراعية يعتمد على مدخلات الفحم والنفط. ولم يعد المزارعون الأمريكيون مجرد مديرين مهرة ضالعين في تدفقات الطاقة الشمسية المتجددة: بل صارت منتجاتهم مدعومة بصنوف الوقود الأحفوري.

حدود الزراعة التقليدية

إن التناقضات الاجتماعية - الاقتصادية الهائلة بين الحياة في عهد أسرة تشين، أي في فترة التوحيد الأولى في الصين (221-207 ق.م.) والعقود الأخيرة من إمبراطورية تشينغ (1644-1911) أو بين بلاد الغال السلتية الرومانية وفرنسا ما قبل الثورة تنسينا القوى المحركة الأولى التي لا يمكن تجاهلها وثبات الممارسات الزراعية الأساسية خلال آلاف السنين التي سبقت التاريخ الصناعي. فالسكان، وليس لهم ما يدعمهم غير جهود الناس والحيوانات وإعادة تدوير الفضلات العضوية وزراعة البقوليات، تزايدوا بفضل التقدم في استعمال القوة الحيوية وتكثيف الممارسات الزراعية.

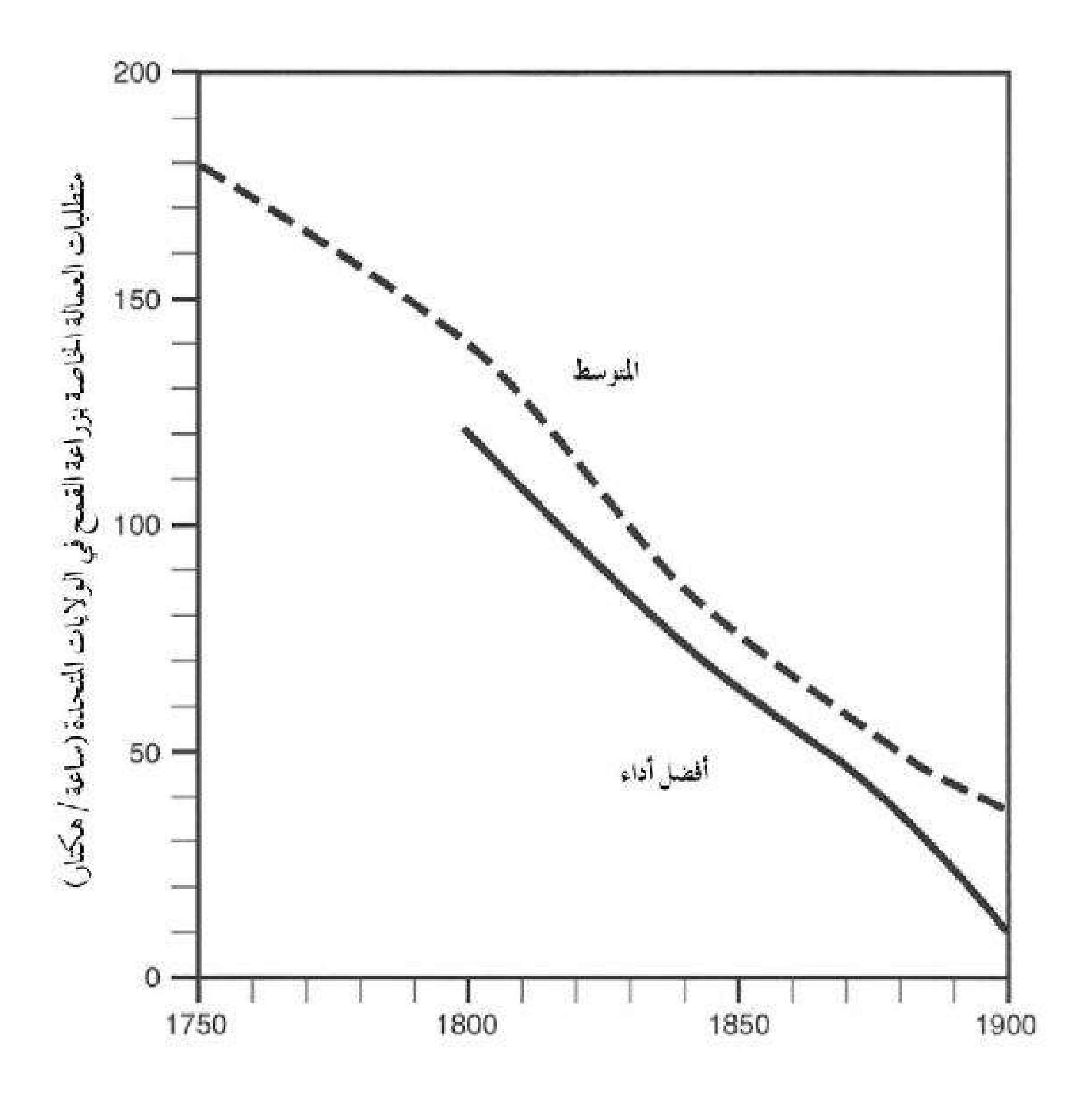
في الأقاليم ذات الإنتاجية العالية مثل شمال غرب أوروبا، ووسط اليابان، وسواحل الصين، اقتربت المحاصيل من الحدود التي فرضتها المعدلات القصوى الخاصة بالطاقة المتوافرة وتدفق الغذاء في أواخر القرن التاسع عشر. وفي الوقت عينه، لم تجلب زراعات ما قبل الصناعة سوى تطورات محدودة جداً في الغلال، كما أنها لم توافر من الغذاء إلا ما يكفي لسد رمق معظم الناس حتى في سنوات الخير، ولم تستطع أن تمنع تفشي سوء التغذية المزمن وتكرار المجاعات. من ناحية أخرى، كانت الترتيبات المنتجة، والمقاومة، والمرنة، والمطاوعة ترتيباتٍ هشة، وسريعة العطب، ولا تفي بالحاجات المتزايدة.

المنجزات

كان التقدم في الزراعة التقليدية بطيئاً، ولم يؤد استخدام الطرائق الجديدة إلى اختفاء الممارسات القديمة. فالحقول المراحة، ومحشات الحصاد، والثيران المشدودة إلى النير شداً سيئاً لم تختف من أوروبا مع انتشار الزراعة السنوية، وحصادات الحبوب، وأطقم الخيل الجيدة في أواخر القرن التاسع عشر. كانت الطريقة الوحيدة لتقليص العمل الآدمي في نظام تعتمد فيه أعمال الحقل على القوة الحيوية وحدها هي استخدام المزيد من حيوانات الجر على نطاق واسع. لكن الانتقال لم يكن بحاجة إلى تطوير طريقة التكدين والعلف والاستيلاد وحسب، بل كان بحاجة إلى الابتكار في تصميم أدوات الحقل وآلات لإنجاز عمليات محددة تحل محل العمل الآدمي.

بالرغم من بدايتها البطيئة، تسارعت وتيرة هذه التطورات خلال القرن الثامن عشر. وربما كانت مقارنات زراعة القمح خير ما يدل على هذا التقدم. ففي العقود الأولى من القرن الثامن عشر كانت زراعة هكتار واحد من القمح في أوروبا وأمريكا الشمالية تستغرق 200 ساعة تقريباً، أو الوقت ذاته الذي كانت تستغرقه في العصور الوسطى. وفي عام 1800 انخفض المعدل في أمريكا إلى ما من دون 150 ساعة، وفي عام 1850 إلى ما من دون 100 ساعة. وفي عام 1900 صار الزمن المطلوب أقل من 40 ساعة، كما أن أكثر الممارسات إنتاجاً (الحراثة متعددة السكة والحصادة - الدراسة في كاليفورنيا) كانت بحاجة إلى أقل من تسع ساعات لإتمام المهمة (الشكل 3-15).

صحيح أن التكثيف المتدرج للزراعة التقليدية الذي تحقق بإحلال حيوانات الجر محل الجهد الآدمي زاد من معدل الإنتاج، لكن تأثيره في معدل الغلال لم يظهر لمدة طويلة من الزمن. ويتعذر تحقيق أي تقييم طويل الأمد بسبب ندرة المعلومات التي لدينا وعدم دقتها. لكن الواضح أن الركود والمكاسب الهامشية كانت هي السائدة في أوروبا وآسيا. لم نكن نملك أي معدلات موثوقة على الصعيد الإقليمي أو الوطني حتى العقود الأولى من القرن التاسع عشر. فمعظم الأرقام القديمة في المصادر الأوروبية تعطي مردودات نسبية للبذور المزروعة، عادة ما تكون مقدرة بالحجم،



الشكل 3-15

من الممكن تمثيل تحسين كفاءة زراعة القمح خلال القرن التاسع عشر بالخطوط البيانية تمثيلاً دقيقاً بناء على المعلومات التي جمعها روجين (1931) ووزارة الزراعة الأمريكية (1959).

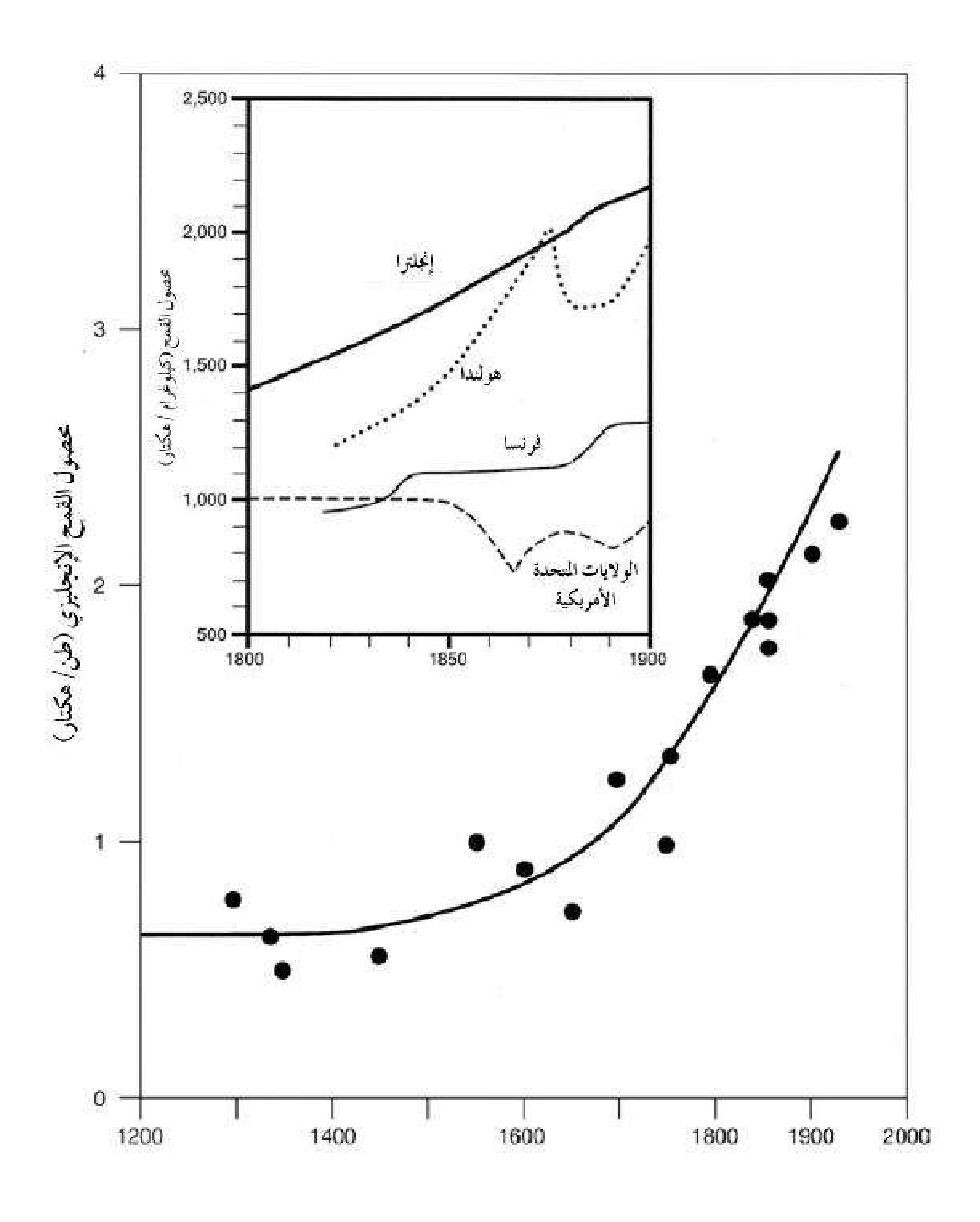
بدلاً من الكتلة. وبما أن هذه البذور كانت أصغر من الأصناف المحسنة التي نعرفها اليوم، فإن التحويلات إلى كتلة غير مؤكدة. زد على ذلك أن أفضل سجلات الأديرة والإقطاعيات تعاني من

فجوات، وكلها تبين عملياً تذبذبات من سنة إلى أخرى. ففي العصور الوسطى، كانت الأحوال الجوية القاسية تعطي محصولاً سيئاً لا يكفي لتأمين بذار الموسم التالي.

تشير أفضل التقديرات إلى أن العائدات في بواكير العصور الوسطى كانت مجرد الضعفين بالنسبة إلى القمح. وتشير معلومات مستقاة من أفضل عملية استقصاء طويلة الأجل شملت سائر أنحاء البلاد في القرون السبعة الماضية (بينيت Bennett أ1935؛ ستانهيل Stanhill أ1976؛ كلارك Clark أ1991؛ برنت Brunt أ1999) إلى أن عائدات بذور القمح الإنجليزي في القرن الثالث عشر تراوحت بين ثلاثة وأربعة، حيث بلغت أقصى عائدات مسجلة 5.8؛ أي ما يزيد على 500 كغ/هكتار. وتبين التحليلات الدقيقة للبرهان الإنجليزي المتوافر أن مضاعفة هذا المعدل المتدني لم تتم إلا بعد خمسة قرون. وبقيت محاصيل القمح الإنجليزي حيث كانت في العصور الوسطى حتى عام 1600، لكنها زادت بعدئذ زيادة ثابتة.

مع إطلالة عام 1800 تضاعف متوسط محصول البلاد لعام 1500 مرتين، ثم زاد ثلاثة أضعاف في عام 1900، نتيجة تصريف المياه الزائدة وتطبيق الدورات الزراعية والتسميد المكثف بروث الحيوانات (الشكل 3-16). في عام 1900 كانت الزراعة البريطانية تستفيد من الآلات المتطورة استفادة كبيرة، وتستفيد أكثر من التطورات السريعة في اقتصاد البلاد الذي يقوم على تزايد إحراق الفحم. ويبدو أثر إسهامات الطاقة الأحفورية هذه بوضوح في المحاصيل الهولندية. على عكس المحاصيل الفرنسية التي لم تحقق سوى ارتفاع بسيط حتى خلال القرن التاسع عشر، كما كان هناك انحدار في المحصول الأمريكي الذي زرع بكفاءة وكثافة في الوقت ذاته (الشكل 3-16). وباستخدام أفضل معدلات المحاصيل المتوافرة، نرى أن ساعة من العمل في العصور الوسطى لم تنتج أكثر من 3-4 كغ من الحبوب. وفي عام 1800 بلغت معدلات الإنتاج نحو 10 كغ. بعد ذلك بقرن من الزمن اقترب المعدل من 40 كغ، ثم تخطى أفضل أداء 100 كغ بكثير.

زادت عائدات الطاقة بسرعة أكبر على اعتبار أن كمية الجهد الذي تحتاجه ساعة من العمل في أواخر القرن التاسع عشر أدنى من الجهود الأنموذجية في العصور الوسطى: الحراثة اليدوية باستخدام محراث ثقيل والدجر الخشبية الذي تجره الثيران يتطلب جهداً أكبر بكثير من الركوب على محراث فولاذي تجره مجموعة من الخيل القوية. كانت سلسلة زراعة القمح الكاملة في العصر الروماني أو أوائل العصور


محصول القمح الإنجليزي (طن/ هكتار)
محصول القمح (كيلوغرام / هكتار)
إنجلترا
هولندا
فرنسا
الولايات المتحدة الأمريكية
2,500
2,000
1,500
1,000
500
1800
1850
1900
4
3
2
1
0
1200
1400
1600
1800
1900
2000

الشكل 3-16

يشير محصول القمح الإنجليزي إلى فترة ركود طويلة تبعتها فترة انتعاش بعد عام 1600. كانت زيادة المحصول في هولندا خلال القرن التاسع عشر تستحق الإعجاب، لكنها كانت هامشية في فرنسا. أما في الولايات المتحدة فقد أدى التوسع غرباً في زراعة القمح نحو المناطق الجافة فعلياً إلى تدني معدلات المحاصيل. مقتبس من معلومات وزارة الزراعة الأمريكية 1955)، مكتب الإحصاء الأمريكي USBC أ(1975)، ستانهيل Stanhill أ(1976)، كلارك (1991) وبلغرايف مكميلان Palgrave Macmillan أ(2013).

الوسطى تعطي 40 ضعفاً من صافي الطاقة المكتسبة متمثلة في الحبوب المحصودة. وفي أوائل القرن التاسع عشر أعطت مواسم الحصاد في أوروبا الغربية من القمح ما يعادل 200 ضعف من الطاقة التي بذلت في إنتاجها. وفي نهاية القرن تجاوز المعدل 500، حيث تجاوزت أفضل العائدات 2.500.

كان صافي الطاقة المكتسبة (بعد طرح البذار وخسائر التخزين) بالضرورة أقل؛ أي لا يزيد على 25 بالنسبة عما هو مألوف في غلال العصور الوسطى: 80-120 في بداية القرن التاسع عشر، و400-500 في نهايته. لكن هذه المعدلات المرتفعة من إنتاج العمل كانت نتاج زيادة نشر قوى الجر، وبالتالي استثمار كبير للطاقة في علف الحيوانات. في حالة الإمبراطورية الرومانية كانت كل واحدة من وحدات القوة المفيدة المتوافرة للعمل الآدمي تكملها نحو ثماني وحدات من قدرة العمل الحيواني. أما في أوروبا في أوائل القرن التاسع عشر، فقد ارتفع المعدل الأنموذجي لسعة القوة الآدمية/الحيوانية إلى نحو 1: 15، لكنه ارتفع في أكثر المزارع الأمريكية إنتاجاً إلى ما فوق 1: 100 خلال التسعينيات من القرن التاسع عشر. أصبحت العمالة الآدمية مصدراً مهملاً وانتقلت قيمة عمل الفلاحين إلى الإدارة والتحكم، وهذه مهمات لاتحتاج إلا لقليل من القوة، لكن مردود مخرجاتها عال.

ارتفعت كلفة الطاقة الخاصة بقوة الجر بسرعة أكبر. لم يكن زوجان من الثيران الرومانية يعيشان على التبن والقش يستهلكان أي حبوب لقاء تأدية مهامهما الحقلية، وبالتالي لم يكن استخدامهما ينقص كمية الحبوب التي يستطيع الفلاح توفيرها. لكنّ زوجين من الأحصنة الأوروبية في أوائل القرن التاسع عشر كانا يستهلكان طنين تقريباً من الحبوب في السنة، أي نحو تسعة أضعاف إجمالي استهلاك الفرد من الحبوب الغذائية. وخلال تسعينيات القرن التاسع عشر، بلغت حاجة الاثني عشر حصاناً أمريكياً السنوية من الشوفان والذرة 18 طناً أي نحو 80 ضعفاً من إجمالي استهلاك صاحبها من الحبوب الغذائية. ولا يتيسر توفير مثل هذه الكمية من العلف إلا لبضعة بلدان ثرية بالأراضي الزراعية. فعلف 12 حصاناً يتطلب 15 هكتاراً من الأرض الزراعية. ومع أن مساحة المزرعة الأمريكية المتوسطة كانت نحو 60 هكتاراً في عام 1900، لكن ما يزرع منها لم يتخط الثلث. وحتى في الولايات المتحدة، لم يكن باستطاعة أحد الاحتفاظ باثني عشر أو أكثر من

حيوانات العمل إلا كبار مزارعي الحبوب. لكن عدد الحيوانات في المزرعة الواحدة في عام 1900 كان يبلغ في المتوسط ثلاثة فقط (مكتب الإحصاء الأمريكي 1975).

لم يكن بمقدور كل مجتمع تقليدي تكثيف زراعته بالاعتماد على مخرجات أعلى من العمل الحيواني. فتكثيف الزراعة بناء على زراعة متطورة لمساحة محدودة من الأرض الزراعية صار عرفاً في آسيا التي تزرع الأرز، وأبرز الأمثلة على هذه التطورات هي اليابان وأجزاء من الصين وفيتنام، وجاوة - أكثر جزر الأرخبيل الإندونيسي سكاناً. هذه المقاربة، التي دعاها غيرتس Geertz أ(1963) عن حق بالنكوص الزراعي، كانت تعتمد على إمكانية تحقيق محصول عالق من الأرز المروي وعلى الاستثمار الضخم الكامن عبر العقود والقرون في بناء نظم الري وصيانتها وفي الحقول المغمورة والمدرجات.

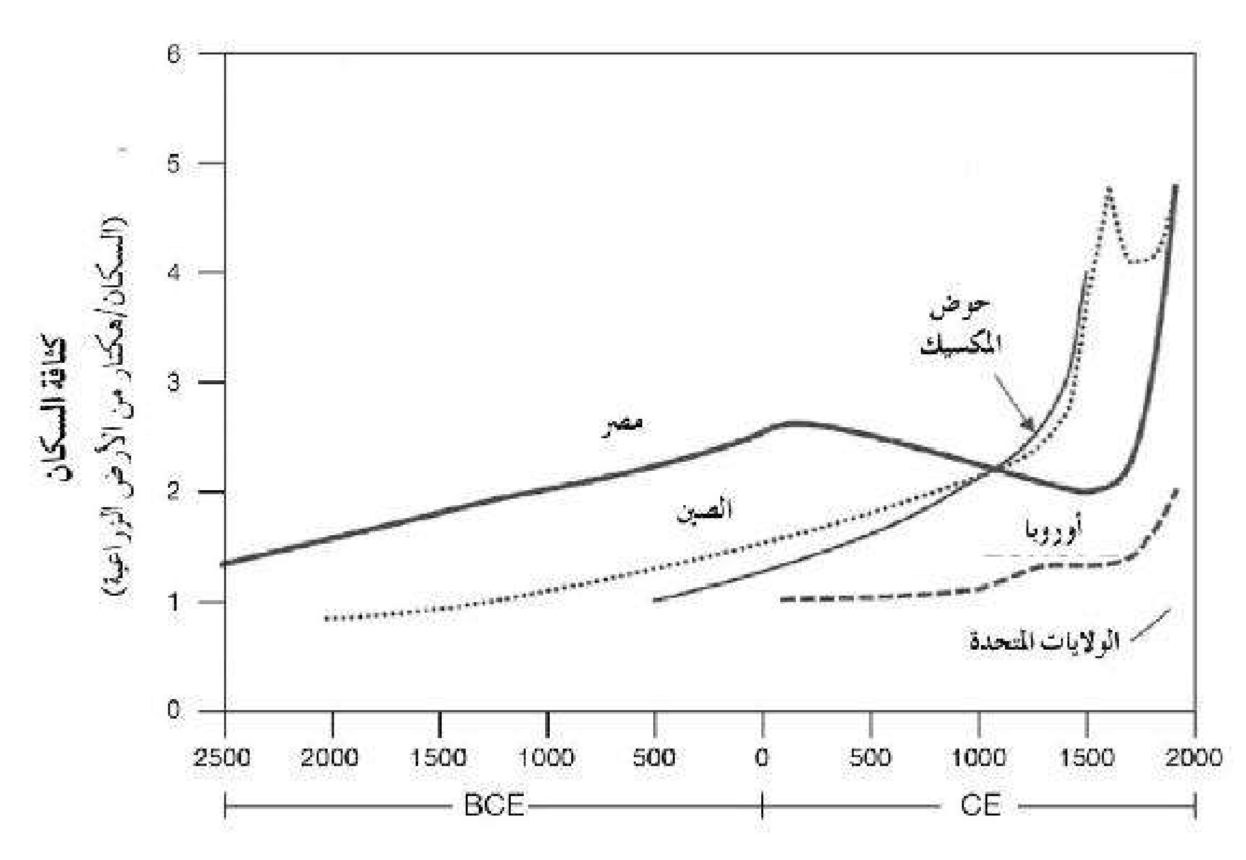
من الممكن أن يُحدث تكثيف الزراعة في الأراضي الجافة بسهولة تدهوراً بيئياً (وبالأخص حت التربة وفقدان المواد الغذائية) بينما نرى أن النظم الزراعية الاقتصادية الخاصة بحقول الأرز أكثر قدرة على التحمل. فالمواظبة على زراعتها عامل ضخم لامتصاص العمل الآدمي. وتبدأ العملية بتسوية دقيقة للحقول وإنتاش البادرات في المشاتل، وتتضمن تقنيات إدارة دقيقة مثل الزرع على مسافات مدروسة، والتعشيب اليدوي، وحصاد النباتات كل على حدة. ويتعذر كسر هذه النزعة الانطوائية بعد تجذرها. صحيح أن هذه العملية تدعم كثافات سكانية أعلى، لكنها تؤدي في النهاية إلى شدة الإفقار. في بادئ الأمر تعاني إنتاجية العمل من الركود، ثم تأخذ في التراجع على اعتبار أن العدد الأكبر من السكان يعتمد على نظم غذائية هامشية أكثر فأكثر. وقد بدت على كثير من أقاليم الصين أعراض نكوص زراعي واضحة خلال حكم أسرتي مينغ وتشينغ.

بعد انتهاء الصراعات في النصف الأول من القرن العشرين، أدت السياسات الماوية القائمة على العمالة الريفية الشعبية في الزراعة الجماعية إلى ترسيخ النكوص الزراعي حتى أواخر السبعينيات. في ذلك الوقت، كان 800 مليون فلاح ما زالوا يمثلون أكثر من 80% من مجمل سكان الصين، واستمروا في العيش على حصص تكفي بالكاد، مع أنها كانت توزع توزيعاً متساوياً. ولم تتراجع هذه النزعة جذرياً إلا مع إلغاء دنغ شياو بنغ للكومونات وخصخصة الزراعة في أوائل الثمانينيات. لكن عدداً من البلدان الآسيوية المنتجة للأرز اتبعت مسار النكوص حتى بعد عام 1950. وفي المقابل تخلت اليابان عن هذا التوجه مع إصلاح ميجي Meiji عام 1868. وقد زاد عدد السكان بين أوائل السبعينيات من القرن التاسع عشر والأربعينيات من القرن العشرين بنسبة 2.2 ضعف. وصاحب هذه الزيادة زيادات أخرى في محاصيل الأرز بينما تراجع عدد سكان الريف بنسبة 40% من المجموع (تاوبر Taeuber أ1958).

بالرغم من الفوارق الأساس بين أنموذجي تكثيف الزراعة الرئيسين - سواء القائم على إحلال الجر الحيواني محل الجهد الآدمي أو على زيادة جهد الفلاحين إلى الحد الأقصى - فإنهما دفعا الإنتاج الزراعي في الاتجاه عينه، أي نحو زيادة بطيئة في الكثافة السكانية. كانت هذه العملية أساساً في توفير كمية متزايدة من العمل الخاص بالنشاط غير الزراعي، وهذا اتجاه أدى إلى التخصص المهني، وتضخم حجم المستوطنات، وظهور الحضارات المدنية وتزايد تعقيداتها.

ولا يمكن بناء هذه التحولات من جديد إلا بشكل تقريبي إذ لا نعلم إجمالي عدد السكان في الماضي على وجه الدقة حتى في المجتمعات المعروفة بإحصائياتها التقليدية الشاملة على المدى الطويل (ويتمور وآخرون Whitmore et al. أ1990). لكن الصعوبة تزداد فيما يخص أي معلومات موثوقة بشأن الأراضي الزراعية، وبالأخص حول مساحات الأرض المصلحة للزراعة التي زرعت بالفعل بمحاصيل سنوية أو دائمة. وهكذا يصبح من المستحيل تقديم اتجاهات موثوق بها في الكثافات السكانية. لكن ما يمكننا عمله ونحن واثقون هو مقابلة أدنى الدرجات التي تميز الزراعات الأولى بصنوف الأداء الأنموذجية اللاحقة (المستمدة من السجلات المكتوبة) ومن ثم مقابلتها بأفضل المنجزات الخاصة بأفضل طرائق الزراعة التكثيفية ما قبل الصناعية (الموثقة توثيقاً جيداً في البحوث الحديثة).

ويبدو أن المعدل الوسطي لجميع الحضارات القديمة يبدأ عند 1 شخص/هكتار من الأرض الزراعية. ولم يتضاعف هذا المعدل إلا بعد قرون عدة من التقدم البطيء. ففي مصر استغرقت مضاعفة هذا المعدل نحو 2.000 عام، ويبدو أن المدة نفسها كانت ضرورية في الصين وأوروبا (الشكل 3-17). وفي عام 1900 كانت أفضل المعدلات الوطنية نحو 5 شخص/هكتار من الأرض الزراعية كما فاقت أفضل المنجزات الإقليمية ضعفي تلك النسبة (وفي القرن العشرين تزايدت بوتيرة أسرع



الشكل 3-17

اتجاهات الكثافات السكانية التقريبية والطويلة الأجل للهكتار الواحد من الأراضي الزراعية في مصر والصين وحوض المكسيك وأوروبا 2500 ق.م.-1900 م. الحسابات مبنية على تقديرات ومعلومات وردت في بيركنز (1969)، ميتشل Mitchell أ(1975)، بوتزر Butzer أ(1976) وتربيري Waterbury أ(1979)، ريتشاردز Richards أ(1990) وويتمور Whitmore وفريقه (1990).

بكثير، ففي عام 2000 كانت نحو 25 شخصاً/هكتار في مصر، و12 في الصين، و3 في أوروبا). لكن ينبغي أن تضع مقارنات الكثافة السكانية في اعتبارها الملاءمة الغذائية وتنوع النظام الغذائي.

التغـذية

الأرقام التي تتابع كثافات السكان في المجتمعات ما قبل الصناعية لا تفصح عن الكثير بشأن ملاءمة النظم الغذائية وجودتها، ولا يمكن حساب متوسط الاحتياجات من الغذاء في مجتمع تقليدي بدرجة معقولة من اليقين: فهناك العديد من الافتراضات المطلوبة لملء المعلومات الناقصة. من ناحية أخرى نرى أن تقديرات الإنتاج ينبغي أن تعتمد على افتراضات تراكمية، مثلما أن الاستهلاك الفعلي تأثر أيضاً بخسائر ما بعد الحصاد الكبيرة والمتغيرة. ولعل التعميم المقبول الوحيد بناء على الدليل الموثق بالمعيار الأنثروبولوجي أنه ليس ثمة اتجاه صاعد واضح فيما يخص كمية الغذاء للفرد الواحد عبر آلاف السنين من الزراعة التقليدية. فبعض أوائل المجتمعات الزراعية كانت في بعض الجوانب أحسن، أو على الأقل، لم تكن أسوأ، من تلك التي أعقبتها. فعلى سبيل المثال نرى أن إعادة بناء لوائح الحصص في بلاد ما بين النهرين القديمة التي أعدها إليسون Ellison أ(1981) تبين أن كمية الطاقة المتوافرة يومياً بين 3000 و2400 ق.م. كانت أعلى من معدلها في أوائل القرن العشرين بنسبة 20% في المنطقة ذاتها.

وتشير الحسابات المبنية على سجلات أسرة هان إلى أنه خلال القرن الرابع ق.م. في ولاية واي Wei كان من المتوقع أن يوفر الفلاح العادي لكل فرد من أفراد أسرته الخمسة نصف كغ تقريباً من الحبوب يومياً (يتس Yates أ1990). ويماثل هذا المجموع المتوسط في شمال الصين خلال الخمسينيات من القرن العشرين قبل إدخال الري بالمضخات والأسمدة المركبة (سميل 1981أ). كما تُبين الأرقام الموثوقة أكثر فيما يخص بدايات أوروبا الحديثة انحداراً ملحوظاً في استهلاك الأغذية الرئيسة حتى في المدن التي تتمتع بتقديم أغذية متميزة. فعلى سبيل المثال، نرى أن حصة الفرد السنوية من الحبوب في مدينة روما هبطت من 290 كغ في أواخر القرن السادس عشر إلى نحو 200 كغ بحلول عام 1700، كما أن متوسط نصيب الفرد من اللحوم تراجع أيضاً من 40 كغ تقريباً إلى ما لا يزيد على 30 كغ (ريفل Revel أ1979).

وفي معظم الحالات، قل تنوع النظم الغذائية الحديثة أيضاً، إذ انخفضت نسبة البروتين الحيواني عما كانت عليه في الكميات المستهلكة سابقاً الغنية بالحيوانات البرية، والطير، والبط والأسماك. هذا الانحدار النوعي لم يقابله توافر متوازن من الأغذية الرئيسة، ففي نهاية القرن الثامن عشر عمّت حالات من عدم التوازن الرئيسة، إقليمية واجتماعية - اقتصادية واستمرت حتى القرن التاسع عشر، وتوجب على قطاعات كبيرة من الناس، بل لنقل الأغلبية، في سائر المجتمعات الزراعية التقليدية، الاكتفاء بكميات من الغذاء من دون الحد الأدنى الضروري لحياة صحية نشطة.

وقد وصف فريدريك مورتون إيدن Frederick Morton Eden في المسح الذي أجراه عام 1797 حالة الفقراء في إنجلترا، وقال إنه حتى في الجزء الجنوبي الغني من البلاد كانت الأغذية الرئيسة مجرد خبز يابس وجبن، وذكر أنه في منزل أحد العمال في مقاطعة ليسترشاير كانت

> الزبدة نادرة الوجود، لكن ربما وجد شيء من الجبن بين فينة وأخرى، وأحياناً بعض اللحم أيام الآحاد.... الخبز غذاء الأسرة الرئيس. لكنهم لا يملكون ما يكفي حالياً، وأن أطفاله عراة تقريباً ويتضورون جوعاً. (إيدن 1797، 227).

وقد أظهرت نتيجة إعادة بناء الاستهلاك الغذائي لدى فقراء العمال في ويلز وإنجلترا أنه بين 1787 و1796 كان المعدل 8.3 كغ من اللحم سنوياً (كلارك، هوبرمان Huberman وليندرت Lindert أ1995) وأن استهلاك النصف الأفقر من الشعب الإنجليزي من اللحم كان بالكاد يتجاوز 10 كغ في الستينيات من القرن التاسع عشر (فوغل Fogel أ1991). وفي بروسيا الشرقية لم يكن بمقدور ثلث سكان الريف تأمين ما يكفي من الخبز حتى عام 1847 (إيبل 1962).

وحتى في أوقات الرفاهية كانت النظم الغذائية الأنموذجية -التي توافر الغذاء الملائم من حيث إجمالي الطاقة والمواد الغذائية الأساس- رتيبة إلى حد بعيد وطعمها غير مستساغ. أما الغذاء اليومي الرئيس في مناطق شاسعة من أوروبا فكان يتألف من الخبز (داكن اللون على الأغلب، في المناطق الشمالية فيه القليل من دقيق القمح إن وجد أصلاً)، والحبوب الخشنة (الشوفان، والشعير، والحنطة السوداء) واللفت، والملفوف، ولاحقاً البطاطا. وغالباً ما كانت هذه المواد تمزج في حساء خفيف القوام أو يخنات، ولم تكن وجبات العشاء تتميز عن الفطور أو الغداء. أما الوجبات الغذائية الريفية الآسيوية فكانت تطغى عليها بعض الحبوب. وفي الصين ما قبل الحديثة،، وكذا الحال في الهند، شكل الدخن والقمح والأرز والذرة أكثر من أربعة أخماس إجمالي الطاقة الغذائية.

بعثت الخضر والفاكهة الموسمية الوفيرة الحياة في هذه الرتابة. وشملت الخضر والفواكه الآسيوية المفضلة الملفوف واللفت والبصل والثوم والزنجبيل والإجاص والدراق والبرتقال. كما كان الملفوف والبصل بين الخضر الأوروبية الرئيسة بالإضافة إلى اللفت والجزر؛ كما شكل التفاح والإجاص والخوخ والعنب أكبر محاصيل الفاكهة. أما أهم أنواع الخضر والفاكهة في أمريكا الوسطى فكانت الطماطم والقيوط والفلفل والبابايا والأفوكادو. لقد كانت النظم الغذائية الأنموذجية

في آسيا على الأغلب نباتية كمثيلاتها في مجتمعات أمريكا الوسطى التي لم تعرف أي حيوانات أليفة كبيرة الحجم عدا الكلاب. لكن بعض أجزاء أوروبا تمتعت باستهلاك كميات كبيرة نسبياً من اللحوم في فترات الخير، فالوجبات الغذائية الأنموذجية كانت تحتوي على اللحم بين فينة وأخرى، كما كانت مشتقات الألبان بصفة رئيسة مصدر البروتين الحيواني، ولم تقدَّم المشويات والخضر المطبوخة (اليخنة) والبيرة والمعجنات والنبيذ إلا في الاحتفالات مثل الأعياد وحفلات الزفاف أو الولائم العامة (سميل 2013ث).

وحتى عندما كانت الوجبات الغذائية اليومية توافر كميات كافية من الطاقة والبروتين، ظل نقص الفيتامينات والمعادن ظاهرة منتشرة. فالوجبات الغذائية في بلاد ما بين النهرين التي تعتمد أساساً على الشعير كانت تعاني من نقص فيتامين أ وفيتامين ج حيث تذكر النقوش القديمة إصابات بالعمى ومرضاً يشبه الإسقربوط (إليسون 1981). وعلى مدى آلاف السنين التالية ظل نقص هذين العاملين شائعاً في معظم المجتمعات خارج المناطق الاستوائية. فقلة استهلاك اللحم تسبب نقص الحديد المزمن إذ قلما يتناول الناس الخضر الورقية. أما الوجبات التي تعتمد على الأرز اعتماداً كبيراً فتعاني من نقص خطير في مادة الكالسيوم لاسيما بالنسبة إلى نمو الأطفال: في جنوب الصين كان المتوسط أقل من نصف الحصة اليومية الموصى بها (بَك 1937). واليوم تنتشر في كثير من البلدان الفقيرة الوجبات الغذائية الرتيبة وغير الملائمة التي تسبب سوء التغذية حيث تجاوت الكثافة السكانية الحدود التي يمكن حتى لأشد الزراعات التقليدية تكثيفية أن تدعمها.

الحــدود

بالرغم من بطء التقدم في إنتاجية العمل والمحاصيل، حققت الزراعة التقليدية نجاحاً تطورياً هائلاً. فمن دون كثافات سكانية عالية مدعومة بالزراعة المستدامة لا يمكن نشوء ثقافات معقدة. فحتى محصول عادي من الحبوب الرئيسة يمكن أن يوفر الطعام في المتوسط لعشرة أضعاف الناس الذين توافر لهم الغذاء مساحة الأرض التي يستعملها مزارعون متنقلون. زد على ذلك أن متوسط كمية الغذاء لم تكن لتزيد عن الحد الأدنى اللازم للبقاء، وأضعف الجوع الموسمي والمجاعات المتكررة حتى المجتمعات حيث الكثافة السكانية ضعيفة، والتربة خصبة، والتقنيات الزراعية متقدمة نسبياً.

كان توفير الطاقة أكثر ما يعيق عملية إحلال العمل الحيواني محل العمل الآدمي. إذ ينبغي ألا يسمح لإنتاج العلف المركز اللازم للحيوانات العاملة بإضعاف المحصول الملائم من الحبوب الغذائية. وحتى في الزراعات الغنية في الأراضي القادرة على إنتاج الأعلاف ما كان للنزوع نحو هذا الإحلال أن يتخطى المنجزات الأمريكية التي تحققت في أواخر القرن التاسع عشر. فالمحاريث الثقيلة متعددة السكة والحصادات - الدرّاسات أوصلت الزراعة المعتمدة على حيوانات الجر إلى حدودها العملية القصوى. وبالإضافة إلى عبء تقديم العلف إلى عدد ضخم من الحيوانات المستعملة لمدة قصيرة في أعمال الحقل، كان قسط كبير من العمل يخصص إلى إصطبلات هذه الحيوانات وتنظيفها وحدوها. ومن التحديات اللوجستية الأخرى تكدين أطقم كبيرة من الأحصنة

والتحكم بها. وهنا برزت حاجة ملحة إلى واسطة تحريك أولي أقوى - سرعان ما اتخذت شكل محركات الاحتراق الداخلي.

تم بلوغ حدود الكثافة السكانية في المجتمعات التي تمر بحالة نكوص زراعي من خلال استخدام عمالة آدمية تتناقص عائدات الفرد الواحد فيها تدريجيباً. هذه المكتسبات صارت محدودة بأقصى إمكانات إعادة تدوير النيتروجين. فأشد عمليات نثر مصادر النيتروجين التقليدي كثافة - من إعادة تدوير الفضلات العضوية وزرع الروث الأخضر - وفرت من السماد ما يكفي لدعم 12- 15 فرداً/هكتار من الأراضي الزراعية. ولا يمكن زيادة إنتاج الروث أكثر من الكمية التي يحددها توافر العلف. ففي المناطق كثيفة الزرع لايمكن للروث أن يأتي إلا من بقايا المحاصيل وفضلات هضم الطعام. وبالإضافة إلى ذلك، نجد أن العمل بالروث الثقيل واستخدام الفضلات الآدمية عمل شاق جداً من حيث الجهد المبذول وتكرار العمل اللازم لجمع المادة العضوية ونقلها وتوزيعها.

كان البديل الوحيد الفعال والمتوافر عالمياً هو تدوير المحاصيل التي تحتاج إلى التسميد بنباتات بقولية. ومع ذلك يبقى هذا الحل محدوداً. فزراعة السماد الأخضر البقولي المتكررة تحافظ على الخصوبة العالية للأرض - لكنها تخفض معدل الإنتاج السنوي للحبوب الرئيسة. ومن الممكن زراعة الحبوب البقولية على نطاق واسع من دون إضافة النيتروجين من الخارج، لكن التبادل بين هذين الصنفين من المواد الغذائية يقتصر على محتواهما من الطاقة الغذائية وحسب. صحيح أن البقوليات غنية بالبروتين، لكنها عسرة الهضم وغالباً ما تكون غير مستساغة. كما لا يمكن استخدامها في إعداد الخبز أو صنع الشعيرية إلا في حالات استثنائية قليلة. وبمجرد أن تزداد ثروة المجتمعات، يلاحظ على الدوام أن أحد مظاهر التغير الغذائي فيها تدني استهلاكها من البقوليات.

وبصرف النظر عن الفترة التاريخية، والظروف البيئية، أو حالة الزراعة والتكثيف فإنه ما من زراعة تقليدية استطاعت أن تنتج باستمرار طعاماً يكفي للقضاء على تفشي سوء التغذية. كانت كل المجتمعات عرضة للمجاعات الكبيرة، وحتى تلك التي تمارس أشد الزراعات تكثيفية لم تكن في مأمن من النوازل المتكررة حيث كان الجفاف والفيضانات أكثر الأسباب الطبيعية شيوعاً. وفي الصين في العشرينيات من القرن العشرين عانى الفلاحون فشل ثلاثة محاصيل في حياتهم فشلاً حادا أدى إلى تفشي المجاعات (بك 1937).

استمرت تلك المجاعات نحو عشرة أشهر، وأجبرت ربع السكان المتأثرين على أكل لحاء الشجر والأعشاب. كما هجر سُبع مجمل السكان قراهم بحثاً عن الطعام. ويلاحظ الأنموذج ذاته في معظم المجتمعات الآسيوية والأفريقية. فبعض المجاعات كانت مدمرة على نحو غير عادي حتى إنها بقيت راسخة في ذاكرة الأجيال الجماعية وأدت إلى تغيرات زراعية واقتصادية واجتماعية رئيسة. من الأمثلة البارزة على هذه الأحداث فشل محاصيل الذرة بسبب الصقيع والجفاف في حوض المكسيك بين 1450 و1454 (ديفيز Davies أ1987)، والانهيار الشهير لمحصول البطاطا الأيرلندية بسبب إصابتها بالعفن بين 1845 و1852 (دونلي Donnelly أ2005) والمجاعة الهندية الكبيرة بين 1876-1879 (سيفوي Seavoy أ1986؛ ديفيز 2001).

لكن لمَ لمْ تستطع المجتمعات ما قبل الصناعية تجنب تكرار حالات نقص الغذاء الحادة هذه؟ كان بإمكانهم فعل ذلك إما من خلال توسعة الأراضي المزروعة، أو تكثيف محاصيلهم، أو اتباع الطريقتين معاً - وهذا ما حاولوا فعله. لكن في الغالبية العظمى من الحالات كانت هذه الخطوات تتخذ على مضض، وكثيراً ما كانت تؤجل لمدة طويلة تسمح بتكرار تحول الكوارث الطبيعية إلى مجاعات كبيرة. وثمة سبب واضح لهذا التأخير يتعلق بالطاقة. فتكثيف الزراعة وتوسعة الأراضي المزروعة يتطلب قدراً أكبر من استثمار الطاقة. وحتى في المجتمعات التي تستطيع تأمين عدد كبير من حيوانات الجر، كان معظم هذه الطاقة الإضافية المستهلكة يأتي من العمل ساعات أطول وبذل مزيد من الجهد الآدمي.

بالإضافة إلى ما تقدم، نرى أنه كثيراً ما كانت نسبة إنتاج الغذاء المكثف تقل عن نسب سابقاته الأقل تكثيفاً من حيث الفائدة مقابل التكلفة. وليس من الغريب أن يحاول المزارعون التقليديون تأجيل هذه الأعباء الأكبر والعائدات النسبية الأقل. كانوا في العادة لا يوسعون أو يكثفون محاصيلهم إلا إذا اضطروا إلى تلبية الحاجات الأساسية للسكان الذين تتزايد أعدادهم بالتدريج. وعلى المدى الطويل، كان بمقدور هذا التوسع والتكثيف المتردد أن يدعم عدداً أكبر من السكان، لكن توافر الطعام للفرد الواحد ونوع المواد الغذائية المتوسطة لم يتغير إلا بعد ذلك بقرون أو بآلاف السنين.

هذا التردد في التوسع أو التكثيف ظهر مراراً من خلال المواظبة على ممارسات زراعية أقل استهلاكاً للطاقة. كانت هناك في العادة فترة طويلة للانتقال من المحاصيل المتنقلة إلى الدائمة، إذ كان الفلاحون يترددون حيال توسعة الزراعة نحو مناطق جديدة أو تكثيف محاصيلهم. فإذا عجز الإنتاج المحلي أو الإقليمي عن تلبية احتياجات الأعداد المتزايدة من السكان، لجأ المزارعون إلى توسعة المساحة المزروعة بدلاً من تكثيف المحاصيل في الأراضي الزراعية الموجودة من قبل. لذلك استغرق تبني الزراعة السنوية قروناً من الزمن بدلاً من إراحة الأرض لفترات طويلة مكثفة.

وفي التاريخ أمثلة كثيرة عن كل خطوة من هذه الخطوات المترددة. فنقل الزراعة في مناطق الغابات كانت نتيجته عيش حياة الكفاف وامتلاك القليل من الأشياء المادية - لكنه لدى كثير من المجتمعات بقي طريقة العيش المفضلة حتى بعد العديد من الأجيال التي كانت على تواصل مع المزارعين الدائمين. ومن الممكن ملاحظة التناقضات الشديدة بين مزارعي الأراضي الطينية وسكان الجبال حتى في القرن العشرين في جنوب الصين، وجنوب شرق آسيا وفي مناطق كثيرة من أمريكا اللاتينية والصحراء الأفريقية. لكن من المدهش أن هذه الممارسات استمرت حتى في أوروبا.

ففي الجزيرة الفرنسية، وهي المنطقة الخصبة المحيطة بباريس، كانت الزراعة المتنقلة (حيث كانت الحقول تترك بعد موسمين زراعيين فقط) لا تزال شائعة في بواكير القرن الثاني عشر (دوبي Duby أ1968). وعلى أطراف القارة، وفي شمال روسيا وفنلندا، كانت لا تزال تمارس في القرن التاسع عشر وحتى القرن العشرين في بعض الأماكن (داربي Darby أ1956؛ توينغزبيرغ Tvengsberg أ1995) (الشكل 3-18). ويتجلى التردد في أوضح صوره في عزوف فلاحي الأراضي المنخفضة عن استعمار الجبل القريب على الأطراف أو مناطق التربة

الرطبة. وكانت قرى أوروبا الكارولينجية مكتظة بالسكان، وتعاني باستمرار من شح القمح؛ لكن فيما عدا أجزاء من ألمانيا وفلاندرز لم تجرِ أي محاولات لاستحداث حقول جديدة وراء الأراضي التي تسهل زراعتها (دوبي 1968). ويحفل تاريخ أوروبا المتأخر بموجات من الهجرات الألمانية من المناطق الغربية كثيفة السكان. وبفضل المحاريث المزودة بالدجر الجيدة فتح المزارعون أراضيَ في مناطق كانوا يرونها فقيرة في بوهيميا وبولندا ورومانيا وروسيا، ومهدوا الطريق أمام الصراعات القومية طيلة القرون اللاحقة.

تطلب توسع الزراعة عمالة تقليدية لفتح أراضٍ زراعية جديدة - لكن في أغلب الحالات كان استثمار الطاقة لمرة واحدة مجرد جزء يسير من المدخلات الإضافية المطلوبة للزراعة التعددية والتسميد بالأسمدة العضوية وإعداد المدرجات والري والصرف أو رفع الحقول في الزراعة التكثيفية. وهكذا نجد أنه حتى في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية في آسيا وأروربا، استغرق الانتقال المتدرج من إراحة الأرض المنتشرة إلى المحاصيل السنوية وتعدد المحاصيل آلاف السنين. ففي الصين، كانت كل أسرة حاكمة تتبنى في سنيها الأولى سياسة توسعة الأراضي الزراعية وسيلةً


N:o 738.

الشكل 3-18

الحصاد بطريقة الحش والحرق في أواخر القرن التاسع عشر في أوروبا. في هذه الصورة التي التقطها ي. ك. إنها I. K. Inha عام 1892 في إينو Eno بفنلندا، تحرق النسوة المنحدرات قبل حراثتها وزراعتها بالقمح أو أي نبات عسقولي آخر.

أولية لإطعام الأعداد المتزايدة من السكان (بيردو Perdue أ1987). أما في أوروبا، فاستمرت إراحة 35 - 50% من الأراضي حتى أوائل القرن السابع عشر. كما صاحب النظامُ السنوي الثلاثي المكثف في إنجلترا النظامَ الثنائي منذ القرن الثاني عشر، ولم يصبح سائداً بوجه عام إلا في القرن الثامن عشر (تيتو Titow أ1969).

لاغرابة إذن أن نرى الانتقال من الزراعة المتنقلة إلى الدائمة وتكثيفها يحدث أولاً في المناطق ذات التربة الفقيرة والأراضي الزراعية المحدودة والجافة أو حيث الأمطار غير منتظمة. ومن المؤكد أن الضغط البيئي والكثافة السكانية لا تفسر كل حالة من حالات تكثيف الزراعة وتوقيتها، لكن لا يمكننا التغاضي عن وجود علاقة قوية بينهما. وتعد المكتشفات الآثارية في شمال غرب أوروبا من الأمثلة الممتازة المبكرة. فهناك دليل قوي على أن الانتقال من العصر الحجري إلى البرونزي بدأ في مناطق حيث الأراضي الزراعية محدودة فيما يعرف اليوم بسويسرا وبريطانيا (هاول Howell أ1987).

لقد أدى وجود مساحات واسعة ما يصلح أن يكون أراضيَ زراعية في ثقافة سين وا مارنه Seine-Oise-Marne إلى مزيد من التوسع في الزراعة الانتشارية وبالتالي مركزيتها بدلاً من تكثيفها. وتبين الأدلة الآثارية أن التكثيف في يوكاتان مايا Maya Yucatan بدأ أول ما بدأ في المناطق الهامشية (وهي أكثر جفافاً) أو المناطق الأخصب (وبالتالي كانت ذات كثافة سكانية عالية) من المناطق المتوسطة (هاريسون Hrrison وتيرنر Turner أ1978). والسجلات التاريخية تؤيد هذا الطرح تأييداً واضحاً: في العادة تتقدم عملية التكثيف أولاً إما في المناطق الواقعة تحت الضغط (مناخ جاف أو شبه جاف، تربة فقيرة، إلخ.) أو في المناطق المكتظة بالسكان.

فعلى سبيل المثال، نرى أن إقليم هونان Hunan بتربته الطينية الخصبة وأمطاره الوفيرة هو الآن أكبر الأقاليم المنتجة للأرز في الصين. وفي أوائل القرن الخامس عشر -أي بعد أكثر من ألف سنة من تحول وادي واي هي Wei He الجاف والمعرّض للحت والتعرية (موقع سي آن Xi'an عاصمة الصين القديمة) إلى الزراعة التكثيفية- كان لايزال منطقة حدودية قليلة السكان. أما المزارعون المستوطنون في فلاندرز المكتظة بالسكان فقد سبقوا معظم أقرانهم في ألمانيا وفرنسا بقرن أو اثنين في استصلاح الأراضي الرطبة وتسميد تربتها (إيبل Able أ1962). ومن الممكن تعميم هذه الوقائع بوصفها أساساً مفضلاً لدى مجتمعات الفلاحين التي تسعى إلى تقليص الشغل

المطلوب لتأمين كميات الغذاء الأساس والممتلكات الضرورية. وبصرف النظر عن الفوارق الثقافية، فإن جميع الفلاحين التقليديين تقريباً سلكوا سلوك المقامرين فكانوا يحاولون البقاء ضمن الهوامش الضيقة من فائض الغذاء ما وسعهم ذلك، ويراهنون على مساعدة الطقس على إنتاج محصول جيد آخر في العام القادم. لكن بالنظر إلى قلة غلال محصول القمح وارتفاع نسبة البذور/ المحصول فإنهم كثيراً ما تعرضوا إلى خسارة كانت كارثية في أغلب الأحيان.

لقد أطلق سيفوي Seavoy أ(1986) عبارة «مهادنة العيش» على هذا السلوك - أي القناعة بالمستوى الأدنى من الأمن الغذائي والرعاية المادية بأقل ما يمكن من التكلفة والجهد البدني. كما وجد أيضاً أن ارتفاع معدل المواليد هو الاستراتيجية المهمة الأخرى التي تستطيع تقليص الجهد الذي يبذله الفرد. فتكلفة الطاقة المبذولة في حمل وإنجاب طفل آخر تعد ضئيلة جداً بالمقارنة مع إسهام هذا الطفل في العمل الذي يمكن أن يبدأه في سن مبكرة جداً. ويرى سيفوي (1986، 20) «أن الإكثار من الأولاد (في المتوسط بين 4 و6 أولاد) وإسناد العمل إليهم في وقت مبكر سلوك حكيم جداً في مجتمعات الفلاحين حيث قلة الجهد -وليس امتلاك المتاع المادي- مقياس الحياة الرغيدة».

لكن إصرار سيفوي على تفضيل الفلاحين بشكل مطلق لممارسة الكسل باعتباره قيمة اجتماعية أولية أمر غير مقبول. وبالمثل، حاول كلارك (1987)، من دون أن يعلم على ما يبدو بفرضية سيفوي، أن يفسر الفارق الجوهري بين الإنتاجية الزراعية في أوائل القرن التاسع عشر في الولايات المتحدة وبريطانيا من جهة، ووسط أوروبا وشرقها من جهة أخرى على أساس معدلات عمل أسرع في البلدين الناطقين بالإنجليزية وحسب. لكن مثل هذه التعميمات الجائحة تهمل تأثير كثير من العوامل الأخرى المهمة. فالعوامل البيئية - مثل جودة التربة، وكمية الأمطار، ومدى الاعتماد عليها، ونسبة توافر الأرض إلى الفرد، والأسمدة، والغذاء، والقدرة على رعاية حيوانات الجر - كلها عوامل مؤثرة. وينطبق الشيء ذاته على الخصائص الاجتماعية - الاقتصادية (حيازة الأرض، السخرة، الضرائب، الإيجار، امتلاك الحيوانات، وإمكانية الحصول على رأس المال) والتجديد التقني (طرائق زراعية أفضل، سلالات الحيوانات، المحاريث، وأدوات الزراعة والحصاد).

استعرض كوملوس Komlos أ(1988) بعضاً من هذه العوامل في معرض رفضه المقنع لمبالغات كلارك. فمما لا شك فيه أن كثيراً من الثقافات قللت من قيمة الجهد البدني في الزراعة، وكانت هناك فوارق مهمة في معدلات العمل بين الزراعات التقليدية. لكن هذه الوقائع نشأت من اجتماع معقد بين العوامل الاجتماعية والبيئية، وليس فقط من تمييز مبسط بين الفلاحين الكسالى القانعين بالعيش والذين لا يملكون أي دوافع لكسب ثروة مادية من جهة، وفلاحين مجدين تدفعهم الرغبة في امتلاك ثروة تجارية من جهة أخرى.

وثمة تعميم أخف وطأة يخص الجهد البدني، وهو أنه كان منتشراً على أوسع نطاق ممكن. وهذا يعني عملياً نقل قسط كبير منه إلى النساء والأطفال، الذين هم بصفة عامة أناس من طبقة أدنى في المجتمعات الفلاحية. كانت النسوة مسؤولات في واقع الأمر عن الواجبات سواء في الحقل أو البيت وذلك في كل المجتمعات التقليدية. وبما أن الحمل والإرضاع لم يكونا عبئاً كبيراً فيما يتعلق بالطعام

الإضافي، وبما أن الأطفال يبدؤون العمل في سن مبكرة - وهم في الرابعة أو الخامسة - فإن الأسر الكبيرة كانت أقل طرائق الطاقة المكثفة الرامية إلى تقليص عمل الكبار وتأمين الطعام في الشيخوخة وقت العجز عن العمل.

في تلك الزراعات التقليدية التي كانت تقوم بالدرجة الأولى على عمالة البشر كان من الحكمة الإقلال من أعباء الفرد من خلال الأسر الكبيرة. لكن هذه الاستراتيجية زادت في الوقت ذاته من صعوبة زيادة حصة الفرد من الطعام وتجنب المجاعات المتكررة. كما أن تلك الزراعات التقليدية حيث كانت حيوانات الجر تؤدي معظم الأعمال الشاقة، أو في الواقع كلها، أضعفت الرابطة بين العمالة البشرية وإنتاجية المحاصيل - لكنها كانت تستطيع العمل عند تخصيص جزء كبير من الأرض (والمحصول) لعلف الحيوانات العاملة.

وما كان بمقدور شيء غير مدخلات الطاقات الأحفورية - بشكلها المباشر مثل الوقود والكهرباء، وغير المباشر مثل المواد الكيميائية والآلات الزراعية - أن يقدم الغذاء لعدد متزايد من السكان وكميات أعلى من الطعام للفرد الواحد. فالزراعات الهجينة - مع أول مدخلات الطاقة الأحفورية (غير المباشرة) - بدأت بالظهور في المملكة المتحدة، وكانت آنذاك جزءاً من أوروبا الغربية - والولايات المتحدة، مع تبني الأدوات الحديدية والفولاذية والآلات التي صنعت من معادن صهرت باستعمال فحم الكوك بدلاً من فحم الخشب (في إنجلترا أولاً عام 1709). لكن حتى في عام 1850 كانت الزراعة الغربية لا تزال تعتمد على الشمس بالدرجة الأولى، ومع أن الأجهزة والآلات المعدنية انتشرت في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، إلا أن تأثير المعونات الأحفورية لم يبدأ إلا بعد عام 1910 إثر انتشار استعمال الجرارات والشاحنات والأسمدة النيتروجينية المركبة - وهي صنوف التقدم التي سأطرحها في الفصل الخامس.

الفصل الرابع
وسائط التحريك الأولية والوقود في العصر ما قبل الصناعي

وجب على معظم الناس في المجتمعات ما قبل الصناعية أن يقضوا حياتهم فلاحين، يكدحون بطرائق ظلت في بعض المجتمعات لآلاف السنين من دون تغيير. إلا أن التغيرات في فائض الغذاء الذي كانوا ينتجونه بقوة عضلاتهم ومساعدة بعض الأدوات البسيطة بالإضافة إلى قوة الجر التي وفرتها حيواناتهم كانت كافية لدعم التعقيد المتزايد وغير المنتظم في المجتمعات المدنية. وقد تمثلت هذه المنجزات مادياً وفوق كل شيء في بناء بنى تستحق الإعجاب (تتراوح بين أهرامات مصر القديمة وكنائس الباروك في أوائل العصر الحديث) وفي القدرات المتصاعدة، والمسافات التي تقطعها وسائط النقل (التي تتراوح بين العربات البطيئة ذات العجلات في البر والسفن السريعة القادرة على الدوران حول الكوكب)، والتطورات العديدة في تقنيات الصنع وعلى رأسها التطورات في علم المعادن.

وبقيت وسائل التحريك وأنواع الوقود التي تزود هذه التطورات بالطاقة من دون تغيير على مدى آلاف السنين، لكن عبقرية الإنسان حسنت أداءها بطرائق كثيرة تثير الإعجاب. وفي نهاية المطاف صارت بعض هذه التحولات من القوة والكفاءة بحيث استطاعت أن توافر الطاقة للمراحل الأولى من التصنيع الحديث. وثمة طريقتان رئيستان أسفرتا عن نتاج أعلى وكفاءات أفضل. الأولى كانت تضاعف القوى الصغيرة، وهو بالدرجة الأولى مسألة تنظيم عال، لاسيما مع تطبيق الطاقات الحية. أما الطريقة الثانية فكانت الابتكار التقني الذي أدخل تحويلات جديدة في الطاقة أو زاد كفاءات العمليات الموجودة من قبل. وعملياً كثيراً ما كانت الطريقتان تلتقيان. فعلى سبيل المثال كانت المباني الضخمة التي شيدتها كل ثقافة عالية قديمة بحاجة إلى عمل جماعي وتطبيقات كثيفة لأجهزة تخفيف العمل، وآلات الرفع، وعجلات المدوَس.

كثيراً ما تكون الفوارق بين أولى محولات الطاقة الميكانيكية الموثقة التي استخدمت في بداية الحقبة الصناعية وخليفاتها فوارق شاسعة. فالتصاميم الأولية لمطرقة المغرفة المائلة وهي أبسط الآلات التي تعمل بسقوط الماء، لم تكن تعتمد على الحركة الدورانية، بل كانت مجرد روافع بسيطة متواقتة (الشكل 4-1). فيما بعد حولت النواعير المطارق السقاطة إلى مساعدات يعتمد عليها في أفران المعادن الآسيوية والأوروبية، كما كانت بعض مطارق الحدادة التي تعمل بالماء في القرن التاسع عشر مجموعة من الآلات المعقدة ذات أداء عالٍ لدرجة تستحق الإعجاب (الشكل 4-1).

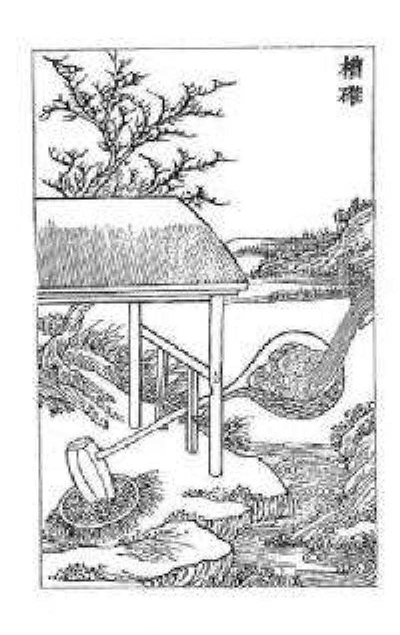
ومن الممكن إجراء مقارنات مماثلة لكل فئة من فئات وسائل التحريك الأولية التي تعمل بطاقة المياه والرياح. وياللفارق الشاسع بين النواعير الخشبية الأفقية التي صنعت بطريقة بدائية في العصور الوسطى والتي لم تتجاوز استطاعتها بضع مئات الواطات (أقل من نصف حصان)، والآلات العمودية التي صنعت بطريقة أفضل بكثير في القرن السابع عشر، باستطاعة أعلى بعشرة أضعاف، والسيدة إيزابيلا - أكبر ناعورة (عجلة مائية) حديدية تعمل بالدفع العلوي باستطاعة تزيد على 400 كيلو واط - وهي تعادل 600 حصان تقريباً، أو بين طواحين العصور الوسطى الأوروبية الثقيلة قليلة الكفاءة التي ينبغي توجيهها نحو الريح بصعوبة بالغة مع هدر 80% من استطاعتها الممكنة بسبب الأشرعة البالية والمسننات السيئة ونظيراتها الآلية في القرن التاسع عشر في أمريكا المزودة بأشرعة ذات نوابض ونواقل حركة سلسلة سهلت عملها - وكانت تستعمل غالباً في ضخ الماء - وساعدت على فتح السهول الشاسعة.

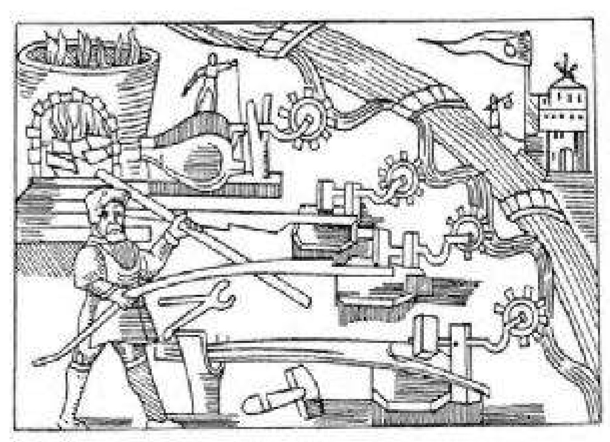
والتناقضات ليست أقل أثراً فيما يخص التحولات الحيوية وحرق الوقود النباتي. فحصان ثقيل في القرن التاسع عشر من أحصنة الجر مزود بحدوات حديدية

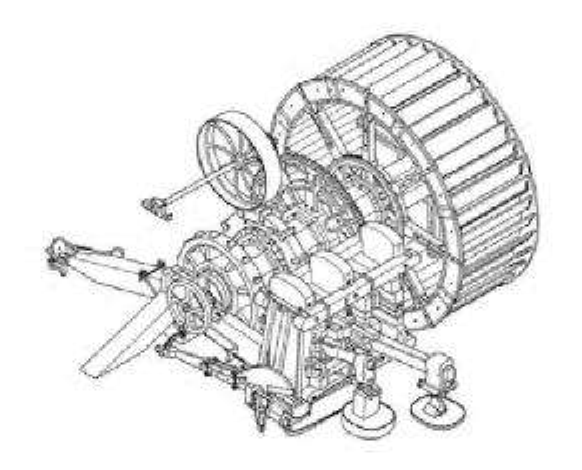
الشكل 1-4

كان الماء الجاري يحرك هذه المطارق الثلاث، لكن تعقيدها وأداءها كانا مختلفين اختلافاً كبيراً. فمطرقة المغرفة المائلة البدائية عند الصينيين التي راجت في أوائل القرن الرابع عشر كانت مجرد رافعة تعمل بسقوط الماء فوقها (في الأعلى)، لكن مطارق السقاطة الأوروبية التي انتشرت في أواخر القرن السادس عشر كانت تعمل بوساطة نواعير تنقل قوتها الدورانية بأعمدة توصيل (الوسط). أما في إنجلترا فكانت المطارق المائلة في أفران الحديد في القرن التاسع عشر آلات قابلة للضبط وعالية الأداء (الأسفل).

مقتبسة من رسوم في نيدام (1965) و(رينولدز Reynolds أ1970).


槽碓





ومكدن بنير عنقي مشدود إلى عربة مسطحة تسير على طريق صلبة كان يستطيع بسهولة أن يجر حملاً يفوق عشرين مرة الحمل الذي استطاع جره جده النحيل المكدن بنير صدري مشدود، بلا حدوات، إلى عربة خشبية ثقيلة تسير على طريق طينية. ومن ناحية أخرى كان الفرن العالي في القرن الثامن عشر يستهلك أقل من عشر الفحم لكل وحدة من الحديد الساخن المنتج ما كان يتطلبه سابقه الأول في العصور الوسيطة (سميل 2016). إلا أن القدرة البشرية على العمل الثقيل لم تتغير كثيراً بين العصور القديمة وبدء العصر الصناعي. فحتى اكتساب الوزن في المجتمعات بمرور الوقت لم يترك سوى تأثير جانبي على الجهد العضلي، وكان الجهد الثقيل يتطلب دائماً اجتماع قوى الكثير من الأفراد.

لتحريك مسلة مصرية تزن 327 طناً من الموقع الذي تركها فيه الرومان (أمر كاليغولا Caligula بنصبها في السبابنا المركزية في ساحته، التي تقع الآن جنوبي سان بيترو) مسافة 269 متراً شرقاً، استخدم دومينكو فونتانا روافع خشبية يصل طولها إلى 15 م وبكرات لرفعها من قاعدتها القديمة، وفي 10 سبتمبر، 1586، حين رفعها في وسط ساحة القديس بطرس في روما اعتمد على 900 رجل و75 حصاناً لوضعها على أساس جديد (فونتانا Fontana أ1590؛ همفيل Hemphill أ1990). تم إنجاز المشروع بأكمله في 13 شهراً واستغرقت عملية نصب المسلة يوماً واحداً. وشملت عمليات نقل المسلات الأخرى المسلة القائمة الآن في ميدان الكونكورد في باريس (في 1833)، وعلى ضفة نهر التيمز (1878) و(منذ عام 1881) في حديقة سنترال بارك في نيويورك (بيتروسكي Petroski أ2011).

حين نصب أثقل عمود في العالم - ويزن 604 أطنان من الغرانيت الفنلندي الأحمرتخليداً لانتصار روسيا على جيش نابليون الغازي - في سان بطرسبرغ في 30 أغسطس، 1832، اعتمد المهندس الفرنسي أوغست دو مونفيراند Auguste de Montferrand على 2400 رجل (مهمة 1700 منهم الجر الفعلي) أنجزوا العمل في أقل من ساعتين (المربع 4-1). والجهازان الأساسيان اللذان وفرا الميزة الميكانيكية الضرورية لعلميتي الرفع هاتين واللذان مكنا الرجال من تنفيذ كثير من عمليات النقل والرفع وتغيير الأماكن الصعبة - هما المستويات (الجسور) المائلة والروافع - لم يكونا معروفين منذ زمن الإمبراطوريات القديمة وحسب، بل كانا معروفين بحكم الضرورة قبل ذلك بوقت طويل - وإلا فكيف رفعت أحجار ستون هنج الخارجية التي تزن الواحدة منها 40 طناً؟

في بداية هذا الفصل سأجري أولاً تقييماً لأنواع وسائط التحريك وقدراتها وحدودها سواء أكانت بشرية أو حيوانية، أو معتمدة على الرياح والماء بالإضافة إلى إحراق الوقود النباتي، ومعظمه من الخشب والفحم المصنوع منه. لكن في الأماكن التي قطعت فيها الغابات هناك أيضاً أنواع عدة من بقايا المحاصيل (لاسيما التبن المتبقي عن الحبوب) وفي الأراضي العشبية والروث الجاف. بعد ذلك سأبحث بشيء من التفصيل في استخدام وسائط التحريك الأولية والوقود في قطاعات حيوية من الاقتصاد: مثل تحضير الطعام، وتوفير الحرارة والضوء في البر والنقل المائي، وفي البناء وعلم المعادن الملونة والحديدية.

قبل ظهور المحركات البخارية كان الجهد الحيواني وتحويل الطاقة الحركية من الماء والرياح (بوساطة الأشرعة والطواحين) وسائط التحريك الأولى الوحيدة في المجتمعات التقليدية. ومع أن تراجع وسائط التحريك الأولية كان سريعاً نسبياً، لكن نواعير الماء وطواحين الهواء احتفظت بأهميتها (بل إن أهميتها ازدادت) في النصف الأول من القرن التاسع عشر، إذ لم تفقد السفن الشراعية أهميتها في عبور المحيط إلا بعد 1880، كما احتفظت حيوانات الجر بهيمنتها على الزراعة الغربية المتطورة حتى ما بعد الحرب العالمية الأولى. لقد زادت المراحل الأولى من التصنيع الطلب على العمالة البشرية التي تراوحت بين الجهد العضلي الكبير في العمل في مناجم الفحم وصناعة الحديد والفولاذ وبين مختلف الأعمال الشاقة المتعلقة في التصنيع مع شيوع عمالة

مربع 1-4

رفع عمود الإسكندر

اقتُلع العمود الجرانيتي الأحمر العملاق الذي صار يُعرَف باسم عمود الإسكندر في فيرولاتي في فنلندا، وتدحرج إلى صندل صنع خصيصاً لنقله قادر على حمل 1.100 طن (وكاد العمود أن يسقط بالماء في أثناء تحميله) ونقل مسافة 190 كم تقريباً إلى ضفة نيفا في سان بطرسبرغ حيث نقل إلى طابق خشبي وجر مسافة 10.5 م فوق سطح مائل ثم وضع بشكل عمودي على منصة فوق القاعدة في وسط ساحة القصر. وبلغ ارتفاع السقالة الخشبية التي نصبت فوق القاعدة 47 م مع خمس كتل للبكرات تتدلى من خمس عارضات مزدوجة من خشب البلوط. وقد بنى مونفيراند أنموذجاً 1/ 12 بمقياس من السقالة لإرشاد النجارين في بنائه (لوكناتسكي Luknatskii أ1936). وتمكنت 60 بكرة رحوية من إتمام الرفع مركبة على السقالة في صفين غير متواقتين. كانت السقاطات المسننة براميل حديدية مركبة في هيكل خشبي، والأجزاء العلوية معلقة من عارضات مزدوجة من خشب البلوط، و522 من الحبال كل منها اختبر ليرفع 75 كغ (ثلاثة أضعاف الحمل الفعلي) ربطت إلى العمود. وبلغ وزن النصب التذكاري مع ملحقاته 757 طناً.

تم رفع العمود في 30 أغسطس، 1832 وتطلب استخدام 1.700 جندي و75 ضابطاً يشرف عليهم رئيس العمال الذي تولى تنسيق الخطوات بحسب قوة الشد في الحبل. وقف مساعدو مونفيراند عند زوايا السقالة الأربع ومعهم 100 من البحارة الذين كانوا يرقبون الكتل والحبال لإبقائها مستقيمة؛ كما وقف 60 عاملاً على البرج ذاته؛ أما النجارون والحجارون وبقية الحرفيين فوقفوا أيضاً في وضع التأهب. وبلغ عدد العمال الذين اشتركوا في عملية الرفع نحو 2.400 عامل، واكتملت العمليات في 105 دقائق. وما يلفت النظر أن العمود حافظ على وضعه العمودي من دون أن يثبت فوق القاعدة الحجرية: حيث ارتكزت الكتلة البالغ ارتفاعها 25.45 م، ومخروطية الشكل قليلاً (إذ يبلغ قطرها عند القاعدة 3.6 م وعند القمة 3.15 م) على قاعدتها وحسب.

الأطفال في البلدان الغربية حتى مطلع القرن العشرين: في عام 1900 26% من الأولاد في عمر 10-15 كانوا يعملون، بينما وصلت نسبة الإناث العاملات في الزراعة إلى 75% (وايبلز Whaples أ2005).

ولا تزال الأعمال الشاقة وعمالة الأطفال منتشرة على نطاق واسع في بلدان الصحراء الأفريقية وفي أشد المناطق فقراً في آسيا: ففي أفريقيا تحمل النسوة أحمالاً ثقيلة من الحطب على رؤوسهن؛ في الهند تقوم النسوة بتكسير الحجر بمطارق صغيرة؛ في الهند وباكستان وبنغلادش يفكك الرجال البواخر الضخمة على الشواطئ الحارة (روزمانيير Rousmaniere وراج Raj أ2007)؛ في الصين يحفر الفلاحون مناجم ريفية صغيرة، وما زال ملايين الناس يخضعون لمختلف ألوان السخرة والعبودية والاتجار بالبشر (منظمة العمل الدولية 2015). من أوضح الدلائل على الهوة الواسعة بين عالم الأغنياء وعالم الفقراء استمرار الاعتماد على العمالة البشرية (بما فيها الأنواع التي تمتهن كرامة الإنسان). لكن حتى في الغرب لم تكن الأشغال الشاقة أمراً نادراً (مثل استخراج الفحم من المناجم تحت الأرض، وصنع الفولاذ، وقطع الأشجار في الغابات، وصيد الأسماك) حتى الستينيات من القرن العشرين، كما كان استخدام وسائل التحريك الحية أكثر من مسألة تحظى بالاهتمام التاريخي: إنه الأساس غير البعيد لرفاهيتنا الحالية.

لكن هذا التقرير عن وسائل التحريك ما قبل العصر الصناعي لن يكتمل من دون ملاحظة اختراع البارود في العصر الوسيط وانتشاره وأهميته التاريخية. ومن الممكن رؤية الإحساس برهبة الرعد والبرق في كل ثقافة قديمة عالية. فالأمل في محاكاة قوتهما التدميرية يتكرر في كثير من الروايات والقصص الخيالية (ليندزاي Lindsay أ1975). لكن المحاكاة الباهتة الوحيدة تمثلت في ربط مواد حارقة في رؤوس الأسهم تطلق في حاويات من المنجانيق. وقد استعمل الكبريت، والنفط والقار وأكسيد الكالسيوم في هذه الخلائط الحارقة. ولم يكن سوى البارود يجمع بين القوة الدافعة والقوة الانفجارية الحارقة الهائلة.

القوة الحية

ظلت صنوف الطاقة الحية أهم وسائط التحريك عند أغلبية البشر حتى منتصف القرن العشرين. وقد قيدت قواها المحدودة، المحاطة بالحاجات الاستقلابية والخواص الميكانيكية لأجسام البشر والحيوانات عملية الوصول إلى الحضارات ما قبل الصناعية. فالمجتمعات التي كانت تستمد طاقتها الحركية كلها (كما كانت الحال في بلاد ما بين النهرين أو مصر باستثناء السفن الشراعية فقط) أو جلها من القوة الحية - ولنا في أوروبا العصور الوسطى خير مثال حيث كان الماء والرياح مقصورة على بعض المهام وحسب، وهذه حال الصين الريفية حتى الجيلين الأخيرين - لم تستطع توفير كمية وافية من الغذاء ولا رفاهية مادية لمعظم مواطنيها.

كانت هناك طريقتان عمليتان لزيادة مردود القوى الحية المفيدة: إما من خلال تركيز المدخلات البشرية أو باستخدام الأجهزة الميكانيكية لإعادة توجيه الجهود العضلية وتضخيمها. أما الطريقة الأولى فسرعان ما تصطدم بالقيود العملية لاسيما استخدام العضلات الآدمية استخداماً مباشراً. فحتى القوة العاملة غير المحدودة تبقى محدودة الفائدة في مجال الإمساك بجسم صغير ونقله إذا كان ثقيل الوزن نظراً لقلة عدد الرجال الذين يمكنهم الإحاطة به. وبينما تستطيع مجموعة من الناس حمل جسم ثقيل، فإن رفعه أولاً لإدخال مقاليع أو عوارض ينطوي على معضلة لا تخلو من التحدي. فقدرات البشر على رفع الأحمال ونقلها محدودة تجاه أحمال أصغر من كتل أجسامها بكثير. فالمحفات التقليدية التي كانت تستعمل في معظم مجتمعات العالم القديم، كان يحملها رجلان كل منهما يحمل على الأقل 20 كغ وحتى 40 كغ حيث تكون الأحمال الزائدة مدعومة بعمودين يرتكزان على أكتافهما.

عند تفريغ السفن والعربات وتحميلها كان الحمالون الرومان يحملون (لمسافات قصيرة) أكياساً زنة كل منها 28 كغ (أوتلي Utley أ1925). أما الأحمال الأثقل فما كان بالإمكان نقلها إلا باستخدام أجهزة بسيطة توافر ميزة ميكانيكية كبيرة عادة ما تكون بنشر قوة أقل على مسافة أطول. وقد استخدمت خمسة من هذه الأجهزة في العالم القديم: وقد عددها فيلو Philo (خلال القرن الثالث ق. م.) وهي العجلة والمحور، والرافعة، ومجموعة البكرات، والإسفين (السطح المائل) واللولب اللامتناهٍ. أما التنويعات والمجموعات الشائعة فتتراوح بين اللوالب والعجلات الدواسة. فباستخدام هذه الأدوات والآلات البسيطة استطاع الناس نشر قوى أصغر على مسافات ما أتاح لهم توسعة مجال النشاط البشري (المربع 4-2). أما الأدوات الميكانيكية المساعدة والبسيطة - وهي الروافع، والمستويات المائلة، والبكرات،

المربع 4-2

العمل والقوة والمسافة

ينجز العمل حين تغير قوة -سواء أكان مصدرها واسطة تحريك أولية حية أو غير حية- حالة الحركة الخاصة بالجسم. وتعادل كمية العمل الناتج عن القوة المستخدمة والإزاحة في الجهة التي تعمل فيها القوة. وبصيغة شكلية نقول إن قوة نيوتن واحد وانتقالاً لمسافة متر واحد تحتاج إلى طاقة قدرها جول واحد (جول = نيوتن متر). ولكي نأخذ فكرة عن هذه القوى المؤثرة نقول إن رفع كتاب يزن 1 كغ من فوق طاولة (0.7 م فوق الأرض) ووضعه على الرف (1.6 م فوق الأرض) يتطلب عملاً قدره 9 جول تقريباً. ورفع حجر متوسط (نحو 2.5 طن من هرم خوفو سوقة إلى الأعلى (نحو 75 سم) يتطلب 18.000جول (18 كيلو جول) أو 2000 ضعف الطاقة التي يحتاجها وضع الكتاب على الرف.

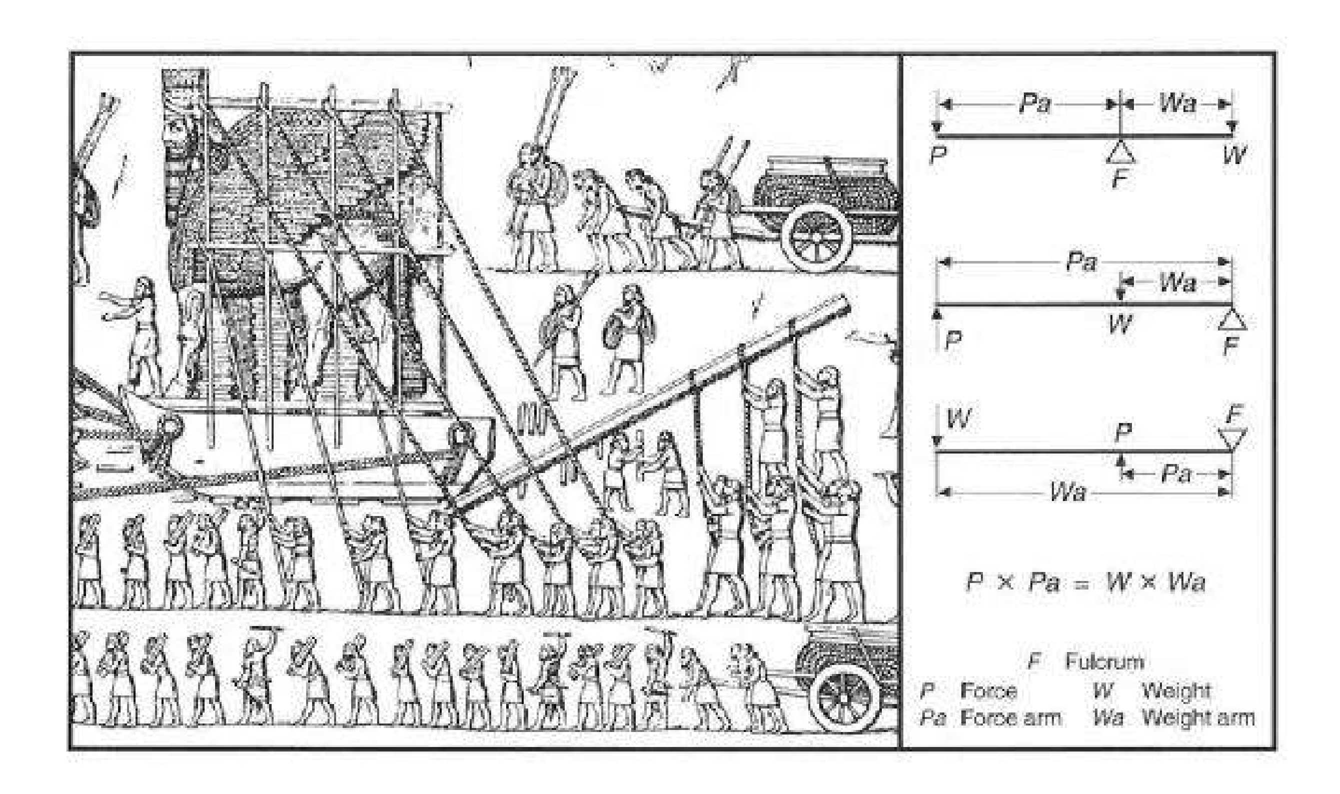
بالطبع فإن من الممكن إنجاز كمية العمل ذاتها من خلال تطبيق قوة أكبر على مسافة أقصر أو قوة أصغر على مسافة أطول: فأي جهاز يحول قوة مدخلة صغيرة إلى قوة مخرجة أكبر يوفر

ميزة ميكانيكية تقاس شدتها على أنها تناسب لا بعد له بين القوتين. هذه الميزة الميكانيكية استغلت منذ القدم من خلال استعمال الروافع والسطوح المائلة وفيما بعد من خلال استخدام البكرات. وهناك أمثلة لا حصر لها من هذه الأعمال في حياتنا اليومية، من فتح الأقفال بالمفتاح (صف من الأسافين، أي، السطوح المائلة، تحريك الدبابيس داخل القفل) إلى نزع مسمار من قطعة خشبية باستعمال مطرقة مخلبية (عمل رافعة).

فكانت تستخدم في كل الثقافات العالية القديمة قريباً (لايسي Lacey أ1935؛ أشر Usher أ1954؛ نيدام 1965؛ بيرستول 1968؛ كوترل Cotterell وكامينغا Kamminga أ1990؛ واي Wei أ2012).

الروافع قطع رفيعة من الخشب أو المعدن تعطي عند دورانها حول نقطة الارتكاز ميزة ميكانيكية يسهل حسابها على أنها حاصل قسمة طولي ذراع القوة وذراع المقاومة (المسافة من نقطة الارتكاز؛ وكلما ارتفع العدد، سهل العمل وازدادت سرعته). كان استخدام الروافع قديماً يتراوح بين تحريك السفن ذات المجاذيف وتحريك أحمال ثقيلة (الشكل 4-2). وتصنف الروافع بحسب موضع نقطة الارتكاز فيها (الشكل 4-2). في النوع الأول من الروافع تكون نقطة الارتكاز بين الحمل والقوة المطبقة التي تعمل في الجهة المعاكسة للحمل المتحرك. وفي النوع الثاني من الروافع تكون نقطة الارتكاز في طرف والقوة تعمل في ذات الجهة التي يعمل بها الحمل. أما روافع النوع الثالث فلا تقدم أي ميزة ميكانيكية لكنها تزيد من سرعة الحمل كما يتضح من عمل النقيفة ومشط الحديقة والمحش.

من الأدوات الشائعة التي تستخدم روافع من الدرجة الأولى المخل والمقص والكماشة (رافعة مزدوجة). كانت العربات أحادية العجلة من روافع الدرجة الثانية الأكثر استعمالاً (نيدام 1965؛ لويس Lewis أ1994). وعادة ما كان للعربات الصينية التي استخدمت في عهد أسرة هان عجلة مركزية كبيرة يحيط بها هيكل خشبي. ومع وجود الحمل فوق المحور مباشرة فقد استطاعت هذه العربات حمل أثقال كبيرة (عادة ما كانت 150 كغ). استخدم الفلاحون العربات لحمل منتوجاتهم إلى السوق ولنقل الناس أحياناً، إذ كانوا يجلسون على الأطراف (هومل Hommel أ1937). وكان من الممكن تركيب أشرعة صغيرة تساعد على الدفع. أما العربات الأوروبية فقد وثقت توثيقاً مقنعاً لأول مرة في العصور الوسطى العليا (أواخر القرن الثاني عشر وأوائل القرن الثالث عشر) وكان أكثر استخدامها فيما بعد في إنجلترا وفرنسا في أعمال البناء والمناجم. أما نقطة ارتكازها فكانت في الطرف، وهذا ما كان يطبق المزيد



الشكل 4-2

للروافع درجات ثلاث تصنف بحسب نقطة تطبيق القوة بالنسبة إلى الجسم (الذي يكون وزنه - و- دوماً متجهاً دائماً نحو الأسفل) ونقطة الارتكاز - ك. ففي الروافع من الدرجة الأولى تتحرك القوة بجهة معاكسة لقوة الجسم. وفي الروافع من الدرجة الثانية تتحرك القوة في ذات الجهة التي يتحرك فيها الجسم، لكن الرافعتين كلتيهما توافران الميزة الميكانيكية ذاتها: فهما تكسبان قوة على حساب المسافة. أما في الروافع من الدرجة الثالثة فإن القوة تتحرك لمسافة أقصر من الجسم، ما يعطي توفيراً في السرعة. وكان للنوعين الأولين من الروافع تطبيقات لا حصر لها في رفع الأجسام ونقلها وفي بناء الآلات. وهناك تفصيل من نقش آشوري **Kuyunjik relief** أعيد بناؤه جزئياً (نحو 700 ق.م.) يبين استعمال رافعة ضخمة لتحريك تمثال هائل الحجم لثور مجنح برأس إنسان. مقتبسة من ليارد Layard أ(1853).

من الضغط على الناس الذين يدفعونها، لكنها مع ذلك كانت توافر ميزة ميكانيكية كبيرة (هي في العادة ثلاثة أضعاف).

تشكل العجلة مع المحور رافعة مستديرة، تمثل الذراع الطويلة فيها المسافة بين المحور والأطراف الخارجية للعجلة، والذراع القصيرة محيط المحور الذي يعطي ميزة ميكانيكية كبيرة حتى للعجلات

الثقيلة فوق سطح خشن. كانت للعجلات الأولى (التي استخدمت في بلاد ما بين النهرين قبل 3000 ق.م.) عجلات خشبية صماء؛ أما العجلات ذات العصي فظهرت على العربات الفردية أولاً بعد ذلك بألف عام، وأسهم الطوق الحديدي للعجلة الخشبية في تخفيف عامل الاحتكاك. ويدل الانتشار السريع لهذا الاختراع في العربات ذات العجلات واستخداماتها غير المحدودة منذ ذلك الحين على مدى أهمية العجلة في العالم القديم. ومن اللافت للنظر أن الأمريكيين لم يكن لديهم عجلات محلية، كما أن البيئة الصحراوية في كثير من الأقاليم الإسلامية جعلت الجمل أهم من العربات ذات العجلات التي تجرها الثيران (بوليه Bulliet أ1975، 2016).

وبإهمال عامل الاحتكاك، تصبح الميزة الميكانيكية لسطح مائل معادلة لحاصل قسمة طول السطح المائل على الارتفاع الذي يراد رفع الجسم إليه. ولما كان الاحتكاك يقلل من الكسب بنسبة كبيرة، فإننا نحتاج إلى سطوح ناعمة وبعض أشكال التشحيم (حيث الماء أسهل مواد التشحيم وأرخصها) للحصول على أفضل أداء. وبحسب هيرودوتس فإن السطح المائل كان الوسيلة الأساس في نقل الأحجار الثقيلة من شاطئ النيل إلى موقع بناء الأهرامات، وكان هناك الكثير من التخمين بشأن استخدامه في بنائها الفعلي (لاحقاً في هذا الفصل سأفسر السبب الذي يدعونا لاستبعاد هذا الخيار). أما أكثر استعمالات السطوح المائلة في العصر الحديث فهي استعمالها كجسور للعبور تتراوح بين صفائح معدنية تصل بين السيارات والسفن، والأرض والسطوح البلاستيكية التي تستعمل في إخلاء ركاب الطائرات في الحالات الطارئة.

ليست الأسافين سوى سطوح مائلة مزدوجة تطبق قوى كبيرة على الجوانب لمسافات قصيرة. وكانت تستعمل عادة في تكسير الصخور بوساطة قطع خشبية تدخل في شقوق الأحجار وترطب، وكأطراف القطع في الفأس والقدّوم. أما اللوالب التي استعملت أولاً في معاصر الزيتون والعنب عند الإغريق فهي ليست سوى سطوح مائلة ملتفة حول أسطوانة مركزية. وكما أشرنا آنفاً في الفصل السابق فإن تصميم اللولب استعمل لرفع الماء الضحل. وتعني ميزتها الميكانيكية الكبيرة أن باستطاعة العامل تطبيق عزم كبير بأقل قدر من الجهد. في كثير من التطبيقات تستعمل البراغي الصغيرة (التي تنتج الآن بالجملة على نطاق واسع وتشد عادة بتدويرها مع عقارب الساعة) كأدوات تثبيت لا يمكن الاستغناء عنها.

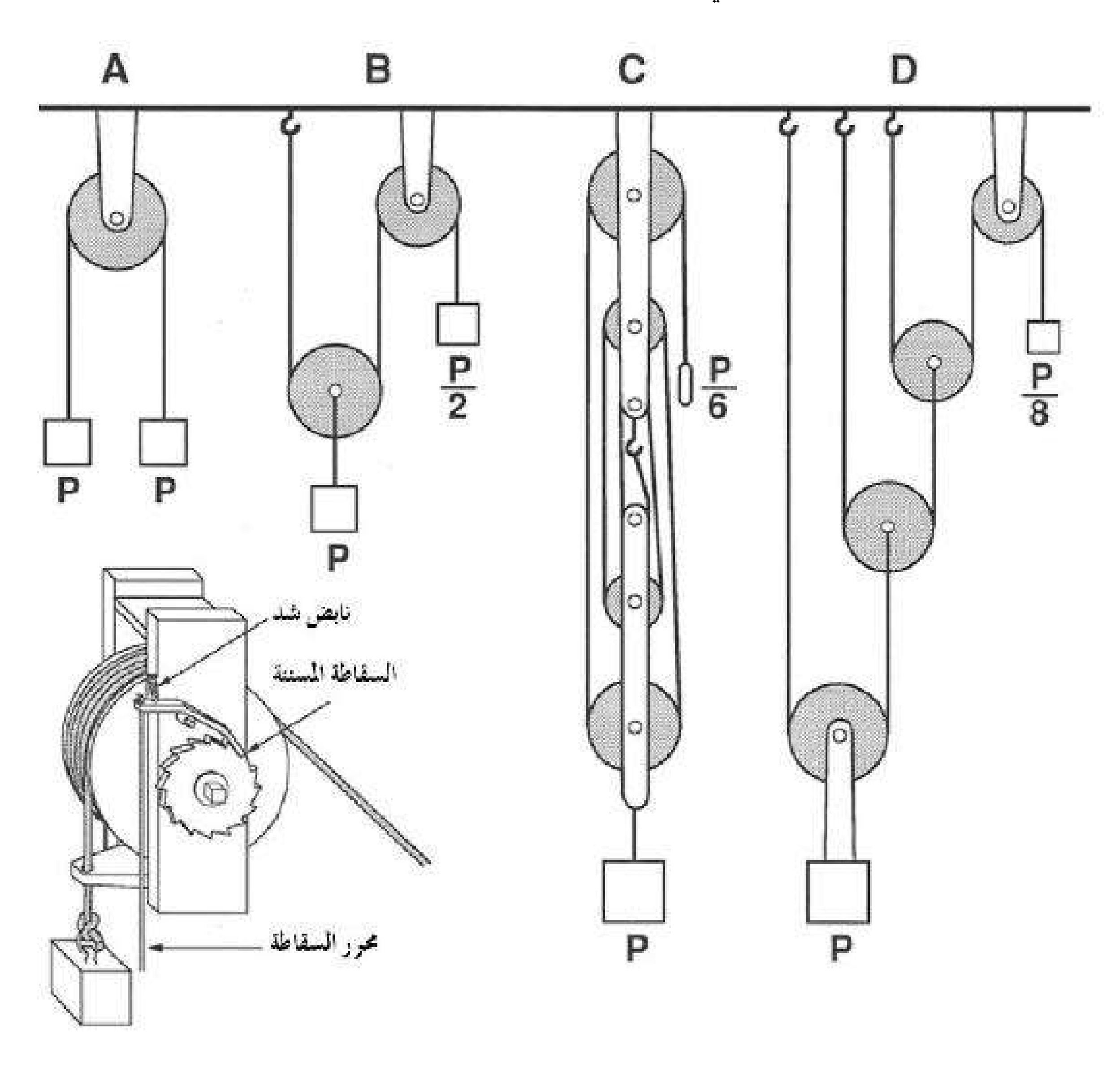
اخترعت البكرة البسيطة، وهي عجلة ذات أخدود يوجه حبلاً أو سلكاً، في القرن الثامن ق.م. وهي تسهل التعامل مع الأثقال من خلال إعادة توجيه القوة، لكن من دون ميزة ميكانيكية، ويمكن أن يؤدي استخدامها إلى سقوط الحمل. تستطيع السقاطة المسننة التعامل مع المشكلة الأخيرة والبكرات المتعددة تتعامل مع النقص الأول حيث إن القوة المطلوبة لرفع الجسم متناسبة عكسياً تقريباً لعدد البكرات المستعملة (الشكل 4-3). ويبين كتاب *Mechanica* الذي ينسب إلى أرسطو، لكنه لم يكتبه، (وينتر Winter أ2007) فهما أوضح للميزة الميكانيكية التي توافرها مثل هذه الأجهزة.

استعمل قدماء الصينيين البكرات بكثرة حتى إن عمليات الترفيه في القصر لم تستطع الاستغناء عنها، ويقال إن فرقة باليه بأكملها تتألف من 220 راقصة سحبت ذات مرة على منحدر من إحدى البحيرات (نيدام 1965). لكن أشهر شهادة قديمة صدرت بإثبات كفاءة البكرات المركبة هي عرض أرخميدس أمام الملك هيرو King Hiero الذي ورد وصفه في كتاب حيوات موازية

لمؤلفه بلوتارك. حين أعلن أرخميدس «أنه إن كان هناك عالم آخر، واستطاع الذهاب إليه، فإن باستطاعته تحريك هذه»، طلب إليه الملك هيرو أن يقدم له عرضاً مناسباً لهذه القوى.

عندئذ ركز أرخميدس اهتمامه على سفينة تجارية ثلاثية الصواري من الأسطول الملكي سحبها عدد كبير من الرجال إلى الشاطئ بعد عناء شديد، وبعد أن أدخل إليها كثيراً من الركاب وحمّلها بالبضائع المألوفة جلس على مسافة منها، ومن دون جهد يذكر، لكن بهدوء، بدأ بتحريك مجموعة من البكرات المركبة بيده وجر السفينة إليه بسلاسة واتزان كما لو كانت تنزلق على الماء (بلوتارك 1961، 4: 78-79).

أصبحت ثلاثة أجهزة ميكانيكية - هي البكرات العمودية، وعجلات الدوس،



الشكل 3-4

إن قوى التوازن في البكرات تتحدد بعدد حبال التعليق. فليس ثمة ميزة ميكانيكية في A. أما في B فالوزن P معلق بوساطة حبلين متوازيين لذا فإن النهاية الحرة لا تحتاج إلا لحمل وزن P/أ2 لتتوازن في C بوساطة P/أ6 وهكذا. فالعامل الذي يرفع مواد البناء باستعمال بكرة أرخميدس (D) يستطيع أن يرفع حجراً وزنه 200 كغ بقوة لا تتجاوز 25 كغ، لكن رفع 10 م يحتاج إلى شد 80 م من حبل الثقل المكافئ. ومن الممكن استعمال السقاطة لإيقاف هذا الجهد في أي وقت نشاء.

والمسننات - أجهزة حيوية في تطبيق القوة البشرية المطلوبة في عمليات الرفع والشحذ والجرش والطرق (راملي Ramelli أ1976 [1588]). لم تكن البكرات العمودية تستعمل في رفع الماء من الآبار ورفع مواد البناء بالرافعات وحسب، بل استخدمت أيضاً في تجهيز أعتى أنواع الأسلحة القديمة وهي المنجنيق الذي استُعمل في حصار المدن والحصون (سودل Soedel وفولي Foley أ1979). وبفضل الملفاف الأفقي (الونش) الذي يحتاج إلى نقل القبضة أربع مرات في كل لفة (الشكل 4-4 الجانب الأيسر) وعمود اللف الشاقولي (الشكل 4-5) صار من الممكن نقل القوة بوساطة الحبال والسلاسل من خلال الحركة الدورانية. أما ذراع التدوير (الكرنك) التي استخدمت أول الأمر في الصين في القرن الثاني الميلادي وأدخلت إلى أوروبا بعد ذلك بسبعة قرون (الشكل 4-4 الجانب الأيمن) فقد يسرت هذا أكثر من السابق ما خلا أنه كان على سرعة تدوير الذراع (الكرنك) (أو الدواسة) أن تتواقت مع سرعة دوران الآلة (غالباً ما كانت المخرطة).

لقد زالت هذه الصعوبة باستخدام ذراع التدوير (الكرنك) لتحريك عجلة خشبية أو معدنية كبيرة (العجلة العظيمة) تركب بشكل منفصل على عمود ضخم ينتقل دورانه إلى المخرطة بوساطة سير جلدي متصالب. وقد سمح هذا باستخدام كثير من نسب المسننات كما أن تسارع العجلة الكبيرة ساعد على الحفاظ على دورات منتظمة بالرغم من ارتفاع الجهد العضلي وانخفاضه. وبفضل هذا الاختراع في العصور الوسطى صار بالإمكان إنجاز الأجزاء الخشبية والمعدنية بدقة لبناء مختلف أنواع الآليات الدقيقة من الساعات إلى المحركات البخارية، لكنه لم يستطع إلغاء العمل الشاق المطلوب عند قطع المعادن الصلبة (الشكل 4-6). لقد توجب على عمال جورج ستيفنسون George Stephenson الذين استعملوا عجلة عظيمة لصنع أجزاء أول قاطرة بخارية أخذ قسط من الراحة كل خمس دقائق (بيرستول Burstall).

أعطى استخدام عضلات الظهر والساقين لتحريك العجلات قوة مفيدة أكثر من تحريك أجزاء الدوران باليد. فأكبر العجلات التي تحرك بالقدمين (وتدعى أيضاً بالعجلات العظيمة - وهي تسمية مربكة) كانت عبارة عن عجلتين تتصل أطرافهما الخارجية بوساطة ألواح يدوس عليها الرجال. وهناك نقش منخفض في أحد المقابر الرومانية في هاتري (نحو 100 ميلادي) يمثل أول صورة

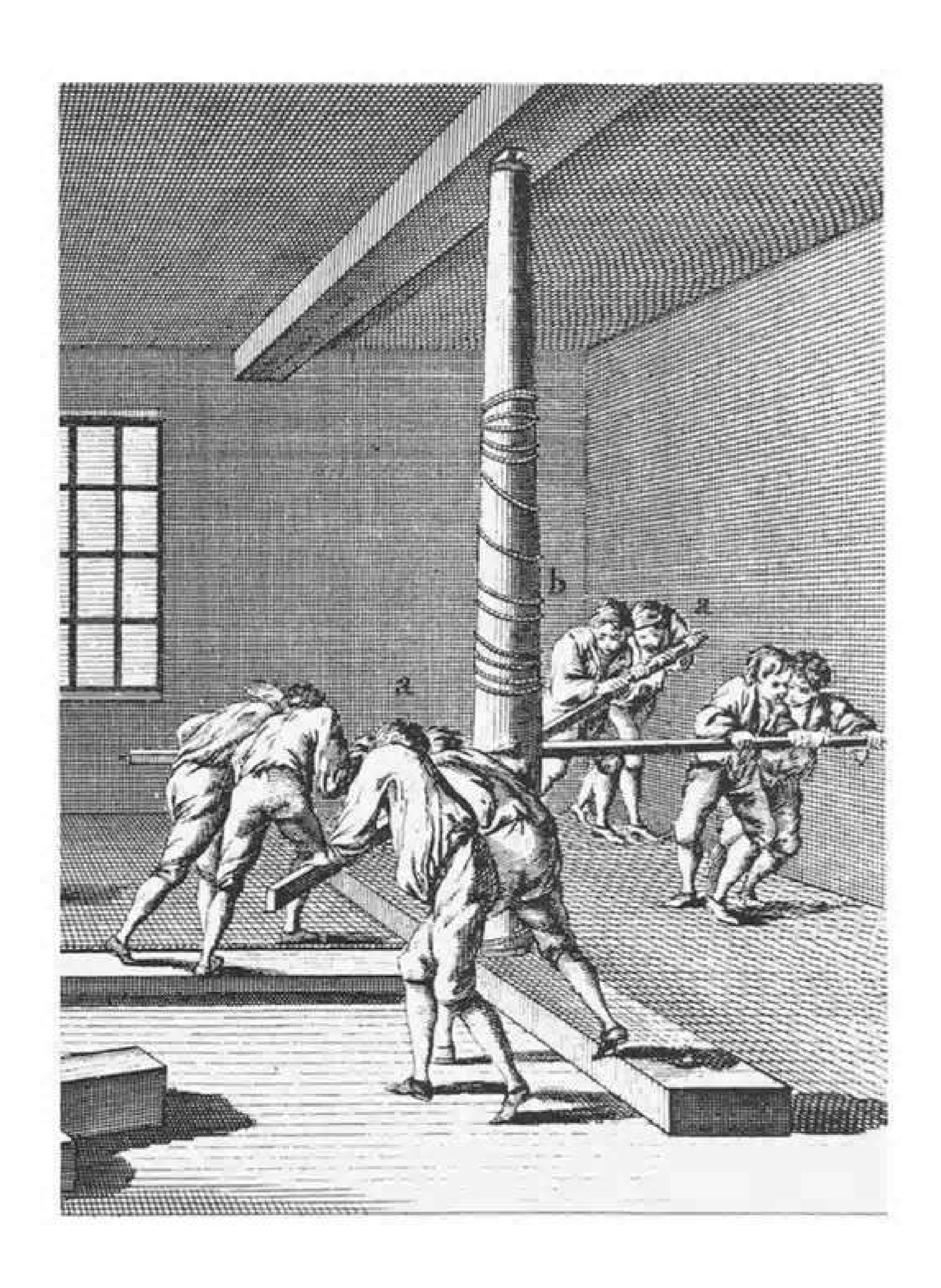
موجودة لعجلة دوس ضخمة داخلية (بوليسباستون *polyspaston* باليونانية). استطاعت عجلات الدوس الرومانية رفع ما يصل إلى 6 أطنان حتى أصبحت هذه الآلات الضخمة مشهداً مألوفاً في أوروبا في العصور الوسطى وأوائل العصر الحديث في مواقع البناء الكبيرة وأحواض السفن وحتى في المناجم حيث كانت تستخدم لضخ المياه (الشكل 4-7).

وبفضل الفارق بين قطر العجلة وقطر محور الطبل اكتسبت عجلات الدوس ميزة ميكانيكية، واستطاعت أن ترفع أثقالاً مثل الأحجار وقطع الأخشاب الضخمة



الشكل 4-4

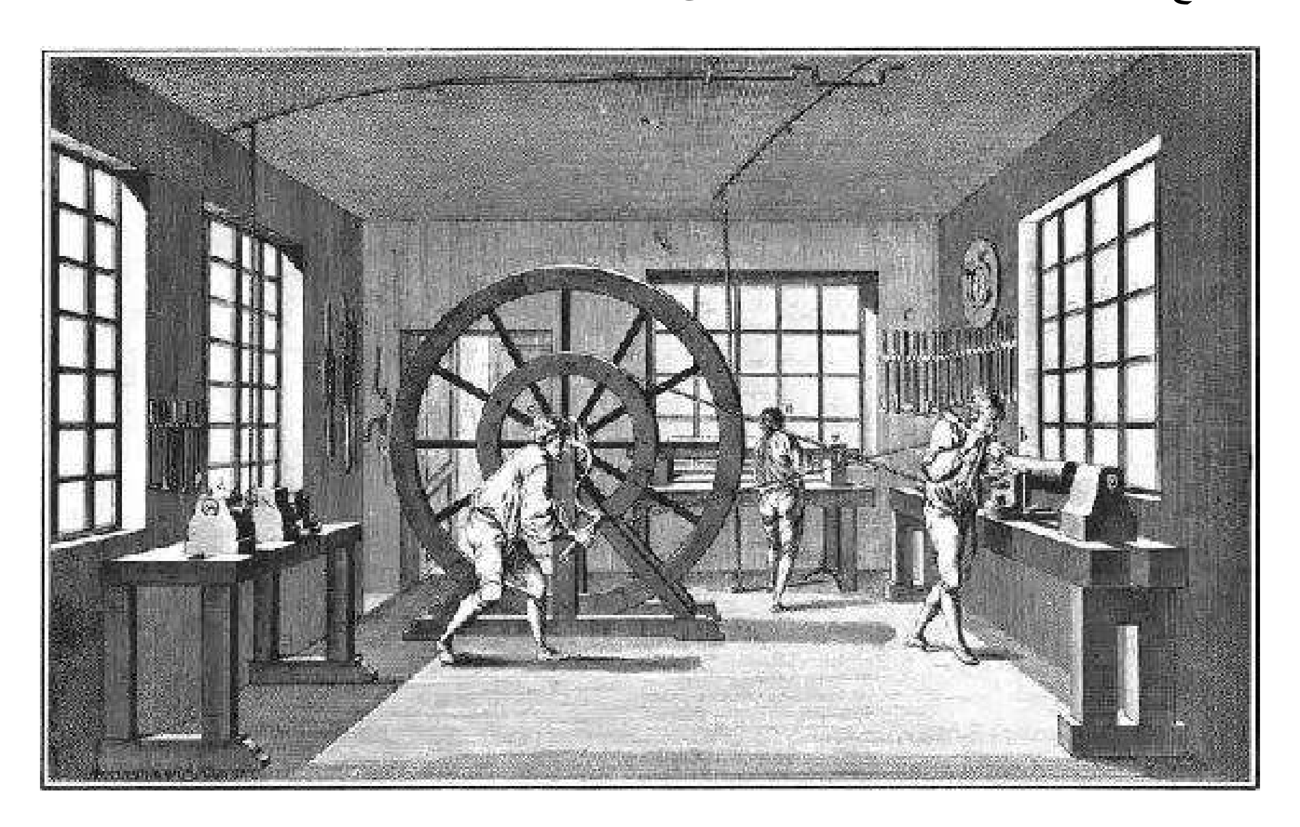
بعض عمال المناجم وهم يستعملون الملفاف الأفقي (إلى اليسار) وذراع التدوير (الكرنك) (إلى اليمين) لاستخراج الماء من البئر. وتساعد عجلة خشبية ثقيلة مزودة أحياناً بقطع من الرصاص مثبتة على العصي الخشبية في عكس جهة الحركة وتسهيل الرفع. مقتبسة من أغريكولا Agricula دو ري ميتاليكا De re metallica أ(1912 [1556]).


b
a
a

الشكل 4-5

ثمانية رجال يقومون بتدوير عمود دوران شاقولي ضخم في إحدى الورش الفرنسية في منتصف القرن الثامن عشر. ويلف العمود حبلاً مثبتاً بكماشة تسحب سلكاً من الذهب عبر قالب. مقتبسة من الموسوعة *Encyclopédie* ا(ديدرو Diderot ودالإمبير d'Alembert أ1769-1772).

أو الأجراس إلى أعلى الكاتدرائيات أو المباني العالية الأخرى. في عام 1563 رسم بيتر بروغل الكبير Pieter Bruegel رافعة تحمل قطعة ضخمة من الحجر إلى الطابق الثاني من برج بابل الذي تخيله (باروت 1955؛ كلاين 1978). كان جهازه المزود بعجلتين دواستين على كلتا الجهتين بحاجة إلى ستة أو ثمانية رجال لتشغيله. صحيح أن العجلات العمودية التي تحرك من الخارج كانت أقل شيوعاً، لكنها سمحت بأقصى



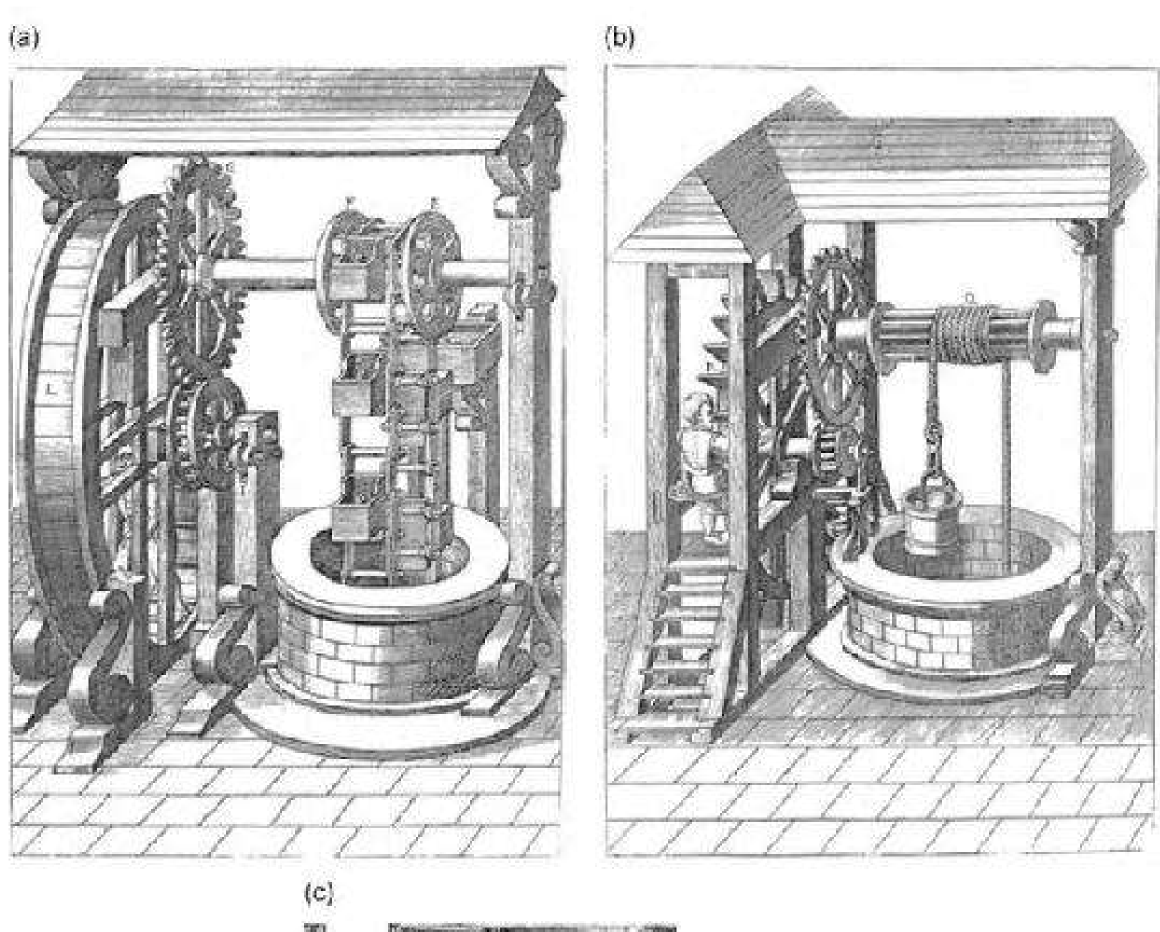
الشكل 4-6

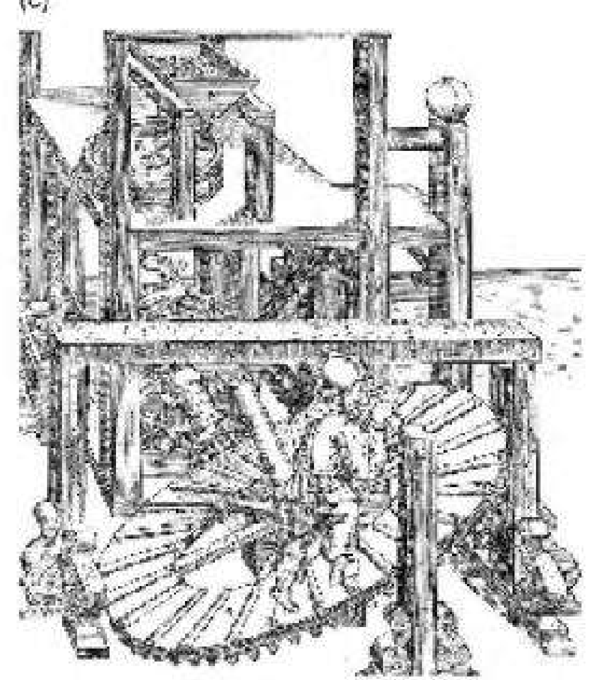
كانت العجلة العظيمة التي تحركها يد التدوير تستعمل لتدوير المخرطة. كانت العجلة الصغرى تستعمل للعمل مع أقطار أكبر والعكس بالعكس. في خلفية هذه الصورة يبدو رجل وهو يشتغل

على مخرطة خشب تعمل بالدواسة. مقتبسة من الموسوعة *Encyclopédie* ا(ديدرو Diderot ودالإمبير d’Alembert ا1769-1772).

درجات العزم عند الدوس على مستوى المحور نفسه (الشكل 4-7). كانت هناك أيضاً عجلات دواسة مائلة يتكئ فيها العامل على عارضة خشبية (الشكل 4-7). في أوائل القرن التاسع عشر شاع استخدام العجلات الدواسة في السجون الإنجليزية (المربع 4-3، الشكل 4-8).

من الممكن تصميم أو تعديل كل أنواع العجلات الدواسة لكي تعمل بالقوة الحيوانية. فلكل الأجهزة طبلية الشكل ميزة إضافية وهي سهولة التحرك إذ باستطاعتها الانتقال من عمل إلى آخر من خلال الدحرجة على سطح مستوٍ. وكانت تلك الطريقة الوحيدة لرفع الأجسام الثقيلة حتى أدخلت الرافعات البخارية. كانت مدخلات القوى القصوى في العجلات الدواسة محدودة بحجمها وتصميمها.





الشكل 4-7

تفاصيل العجلات الدواسة مختلفة العزم. a عجلة دواسة داخلية. b عجلة دواسة خارجية (عزم أقصى). c عجلة دواسة مائلة. مقتبسة من أغريكولا ميتاليكا *metallica* ا(1912 [1556]).

ففي ظل وجود عامل واحد لا تتجاوز القوة 150-200 واط في أثناء فترات قصيرة من الجهد الشاق ولا تتجاوز 50-80 واط خلال فترات الجهد المستدام حين تكون العضلات مرهقة، في حين أن أضخم العجلات الدواسة التي يشغلها ثمانية رجال يمكن أن تعمل لفترة قصيرة عند مستوى 1.500 واط.

في نهاية طيف الجهد المبذول تقع المهمات التي يؤديها عامل واحد يستخدم ذراع التدوير (الكرنك) أو العجلات الدواسة، أو البدالات، أو اللوالب. وتراوحت هذه الآلات التي تعمل بالأيدي أو الأقدام من مخارط الخشب والمطابع إلى آلات الخياطة التي ظهرت أول نماذجها التجارية في ثلاثينيات القرن التاسع عشر، لكن استخدامها على نطاق واسع (سواء التي تدار باليد أو بالقدمين) لم يبدأ حتى الخمسينيات من القرن ذاته (غودفري *Godfrey* أ1982). وخلال الفترة ذاتها، استمرت أعداد كبيرة من الصبية والرجال في تدوير البنكا *punkha* أو *pangkha* باللغة الهندية (باستخدام البكرة) وهي مروحة سقفية مصنوعة من سعف النخيل، وهي الوسيلة الوحيدة للتخفيف من شدة الحرارة الموسمية في الهند لدى كل من يستطيع تحمل أجر البنكاوالا *punkhawallah* الذي يشغل المروحة.

وبقي التساؤل عن كمية العمل المفيد التي يمكن لرجل القيام بها في يوم واحد قائماً مدة طويلة من الزمن، كما اختلفت المقارنات بين الجهد الذي يبذله الرجل في يوم بعمل الأحصنة اختلافاً كبيراً حيث ناهز اختلاف القيم القصوى سبعة أضعاف (فيرغسون *Ferguson* 1971). تضمن تعريف واط لقوة الحصان - التي تعادل 33.000 باوند/قدم في الدقيقة أو 743.7 واط (ديكنسون 1939) - أو ما يعادل سبعة عمال تقريباً. أما أول نسبة يعتمد عليها بثقة فكانت تلك التي أجراها غويوم أمونتون *Guillaume Amontons* أ(1663-1705) الذي ساوى بين عمل صقّالي الزجاج خلال نوبة عمل من 10 ساعات ورفع ثقل مقداره 25 باونداً بسرعة 3 أقدام/ ثا (أمونتون 1699). ويعادل هذا في الوحدات العلمية الحديثة 3.66 ميغا جول من إجمالي العمل المفيد بمعدل 102 واط.

المربع 4-3

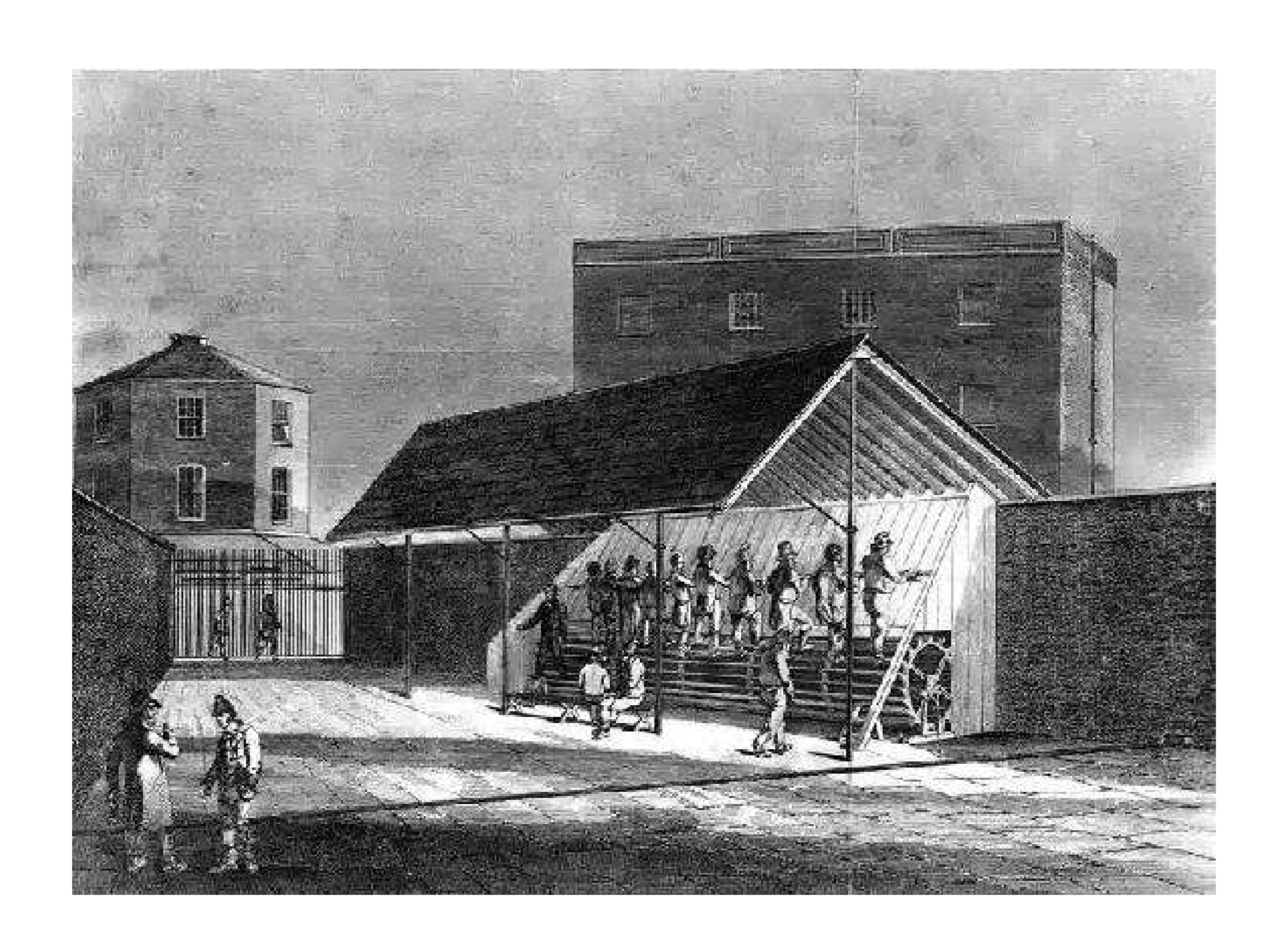
العمل على الطاحونة الدواسة

كانت أضخم الآلات التي تعمل بالقدمين في القرن التاسع عشر في السجون الإنجليزية بعد أن أدخلها ويليام كبيت *William Cubitt* أ(1785-861) كوسيلة من وسائل العقاب، لكنها

سرعان ما استخدمت لطحن الحبوب وضخ المياه وأحياناً لأداء التمارين الرياضية (مايهيو *Mayhew* وبيني *Binney* أ1862). كان لهذه الطواحين الدواسة الطويلة والمائلة المستعملة في العقاب درجات خشبية تحيط بهيكل أسطواني حديدي وتستوعب 40 سجيناً كحد أقصى يقفون جنباً إلي جنب ويمسكون بدربزون أفقي لحفظ التوازن ويضطرون إلى مواقتة خطواتهم معاً. وقد منع استعمال طواحين العقاب في عام 1898.

لكن في عام 1823، أجاب مدير سجن ديفون في جلسة تحقيق عن أحد الأسئلة قائلاً: «أنا لا أرى أن العمل في الطاحونة الدواسة يلحق الأذى بالسجناء، بل يساعدهم على الحفاظ على صحتهم» (هيبيزلي *Hippisley* أ1823، 127). والملايين من المتحمسين لاستعمال السير المتحرك يوافقون على هذا الرأي ويؤكد لاندلز (1980، 11-12) أنه، بالرغم من أننا لا نستطيع الحديث أو التفكير بهذه الآلات من دون اعتبارات عاطفية، فإن عجلة المشي المصممة تصميماً حسناً لم تكن جهازاً ميكانيكياً عالي الكفاءة وحسب، بل كانت مريحة جداً للمشغل أيضاً «إن كان العمل العضلي الرتيب مريحاً!»

لكن ما قوة الناس بوصفهم وسائط تحريك أولية؟ وما درجة كفاءتهم؟ لقد حظي هذا السؤال الأول بإجابة دقيقة قبل وقت طويل من بدء دراسة الطاقة دراسة منهجية في القرن التاسع عشر. وتراوحت التقديرات الأولية بين معادلة عمل حصان واحد بجهد رجلين إلى أربعة عشر رجلاً (فيرغسون 1971). وقبل عام 1800 توافقت المعدلات حول درجة قصوى صحيحة وهي 70-150 واط بالنسبة إلى معظم الكبار العاملين بانتظام لساعات كثيرة. وعند العمل بثبات بمعدل 75 واط، فإننا نحتاج إلى عشرة رجال لمعادلة قوة حصان قياسي واحد.



الشكل 4-8

بعض السجناء يشغلون عجلة المشي في إصلاحية بريكستون (Corbis).

في عام 1998 ألقى شارل أوغستان دو كولومب *Charles Augustin de Coulomb* أ(1736-1806) نظرة منهجية على مختلف الطرائق التي كان الرجال يستعملون فيها قواهم خلال عملهم اليومي (كولومب 1799). هذه التجارب تراوحت بين تسلق تينيريف (2.923م) في جزر الكناري في أقل من 8 ساعات وبين عمل يوم يقوم به حمالو الخشب وهم يصعدون 12 متراً 66 مرة يومياً ينقلون ثقلاً وزنه 68 كغ. فالجهد الأول يعادل عمل إجمالي قدره 2 ميغا جول وقوة قدرها 75 واط، وأما الثاني فيعادل 1.1 ميغا جول تقريباً وقوة قدرها 120 واط تقريباً. وكل التقييمات اللاحقة أكدت مجال القوة الذي رسخته تجارب كولومب: فمعظم الكبار من الرجال يستطيعون الاستمرار بأداء عمل مفيد 75-120 واط (سميل 2008أ). في أوائل القرن العشرين، وبفضل دراسات معدل الاستقلاب البشري الأساس بقيادة فرانسيس بينيديكت *Francis*

Benedict أ(1870-1957) من معهد كارنيجي في بوسطن، نجح العلماء في صياغة معادلات حول الطاقة المصروفة المتوقعة وتعيين عوامل ضرب أنموذجية لمختلف مستويات النشاط البدني (هاريس وبينيديكت 1919)، وكلاهما يصلح لمجال واسع من أنواع الأجسام والأعمار (فرانكنفيلد Frankenfield، موث Muth، ورو Rowe أ1998).

ذكرنا آنفاً أن مقارنة الجهود التي يبذلها البشر والحيوانات تعطينا معدلات كثيرة خاصة بالبشر والخيل. وخلص نيكولسون (1825، 55) إلى نتيجة مفادها أن (أسوأ طريقة لتطبيق قوة حصان هي جعله يحمل أو يجر أثقالاً وهو يصعد مرتفعاً من الأرض؛ فلو كان التل شديد الانحدار لاستطاع رجال ثلاثة أن يتفوقوا على الحصان في العمل... ومن ناحية أخرى،... إذا كان الاتجاه أفقياً.... لما استطاع رجل واحد أن يبذل أكثر من سُبع قوة حصان يؤدي الغرض ذاته». لم يكن استخدام الحيوانات عملياً في جميع الأحوال. وكما أشار كولومب (1799)، فإن المساحة التي يحتاجها الناس للعمل أصغر من تلك التي تحتاجها الحيوانات، هذا بالإضافة إلى سهولة نقلهم وحشد جهودهم.

كان أداء الحيوانات الصغيرة سيئة التغذية في العصور القديمة وأوائل العصور الوسطى أقرب إلى الجهد البشري منه إلى جهود أحصنة الجر القوية في القرن التاسع عشر، إذ كانت الحيوانات تغطى عيونها (أو تكون عمياء) وتربط مباشرة بعريش خشبي مثبت بمحور مركزي يستعمل دورانه في الطحن (الحبوب على الأغلب، والطمي أيضاً لصنع البلاط)، واستخراج (الزيت من البذور، والعصير من القصب والفاكهة) أو لف حبل مربوط بحمل (عند رفع الماء، أو الفحم، أو الفلزات، أو الرجال من المنجم). وفي بعض المشروعات، استخدمت الحيوانات في تدوير عجلات مربوطة إلى مجموعة ذات مسننات تضاعف الميزة الميكانيكية.

كانت الإساءة إلى هذه الحيوانات في غذائها، وإجبارها على السير في دوائر صغيرة لساعات طويلة ممارسات شائعة وهذا ما ذكره لوسيوس أبوليوس Lucius Apuleius في كتابه الأتان الذهبية *Golden Ass* (القرن الثاني الميلادي، هنا في ترجمة ويليام أدلينغتون *William Adlington* الكلاسيكية من 1566):

> كيف أتحدث عن الخيل أيها الأصدقاء وهي تحشر رؤوسها في المزود رغم كبرها في السن وضعفها: أعناقها مثخنة بالجراح ومتعبة؛ خطومها متأذية بسبب السعال المستمر؛ جنباتها عارية بنيرها وسيرها الطويل؛ أضلاعها مكسرة من الضرب؛ حوافرها متآكلة من فرط العمل، وجلودها مشققة بسبب الهزال. حين رأيت هذا المنظر المرعب خشيت أن ألقى ذات المصير.

استمر استخدام الخيل على هذا النحو حتى وقت متأخر من القرن التاسع عشر: كانت الخيل في السبعينيات من القرن التاسع عشر تشغل آلاف الطواحين في ولايات الأبالاشي وجنوبي الولايات المتحدة سواء في المزارع (في طحن الحبوب، واستخراج الزيت، ورص بالات القطن) أو في ضخ المياه ورفع الأثقال من المناجم (هنتر *Hunter* وبريانت *Bryant* أ1991). كانت تسير في

دوائر قطرها أقل من 6 م (انظر الشكل 1-3؛ لو أن الدائرة قطرها 8-10 م لكان العمل أسهل) وقبل استخدام الحافلات الكهربائية (الترام) كان في المدن الغربية حافلات وعربات تجرها الخيل (المربع 4-4؛ انظر أيضاً الشكل 4-18).

وبسبب العوامل ذاتها التي قيدت استخدام الخيل كحيوانات جر في الزراعة منع استخدامها في النقل أو البناء أيضاً. لم تكن المراعي الجيدة ولا الكميات المناسبة من حبوب العلف متوافرة في بلاد البحر الأبيض المتوسط الجافة أو في الأراضي الآسيوية المنخفضة كثيفة السكان، حيث سلب التكدين السيئ قوتها وكفاءتها. في المناطق الجافة من أوراسيا استعملت الجمال المتميزة بقوة التحمل لأداء كثير من الأعمال التي تؤديها الثيران والخيل في أوروبا الأطلسية، أما في آسيا فقد وضعت الفيلة (التي تستعمل في جمع الأخشاب وأعمال البناء وفي الحرب) قدراً كبيراً من الضغط على مصادر العلف (شميدت *Schmidt* أ1996). ونرى في أحد المصادر الهندية الكلاسيكية تمجيداً للفيلة ومدى فعاليتها، لكنه يصف أيضاً الغذاء المكلف لصغارها التي تقع في الأسر عند تدريبها حيث تتغذى على الأرز المطبوخ وموز الجنة *plantain* الممزوج بالحليب وقصب السكر (شودهري *Choudhury* أ1976). ولو بقيت الحيوانات في صحة جيدة

المربع 4-4

أحصنة الجر في النقل في المدن

استعملت أحصنة الجر في المدن لتوصيل الطعام، والوقود والمواد (ولجر العربات من مختلف الأحجام) وللنقل الشخصي في جر عربات هاكني *hackney* ومنذ عام 1834 في جر أنواعها الحديثة مثل العربات التي حصل على براءتها جوزيف هانسون (1803-1882) والمعروفة على نطاق واسع باسم هانسمز *hansoms*. ولكن مع نمو المدن الغربية أدت الحاجة إلى نظام نقل أكفأ إلى إدخال الحافلة التي تجرها الخيل. بدأ استخدامها في باريس عام 1828، وبعدها بسنة واحدة ظهرت في لندن وفي عام 1833 في نيويورك وبعدها في معظم المدن الأمريكية الشرقية الكبيرة (ماك شين *McShane* وتار *Tarr* أ2007). وفي نيويورك بلغ عددها ذروته حين وصل إلى 683 حافلة عام 1853.

أسهمت سيارات الخيل (الحافلات التي تجرها الخيل) على السكك الحديدية في زيادة كفاءة النقل وكانت هذه الخطوط شائعة قبل إدخال الحافلات الكهربائية في ثمانينيات القرن التاسع عشر. كانت حافلات الخيل الخفيفة (التي تحمل اثني عشر راكباً فقط) تجر بجوادين فقط، لكن أربعة جياد كانت مألوفة أيضاً كما أن الحافلات المخصصة لحمل 28 راكباً كثيراً ما كانت تزدحم بالركاب. كانت هناك رحلات كل ساعة، ثم ظهرت خطوط كثيرة أخرى بعد إنشاء عربات السفر إلى الضواحي واستطاعت الوصول إلى مناطق تبعد 8-10 كم عن مركز المدينة في نحو ساعة من الزمن. وكان من الضروري تقديم العلف الجيد إلى الخيل التي تكدح في العمل، وتبين المعلومات التي جمعها ماك سين وتار أن الحصص اليومية الأنموذجية لكل حيوان كانت 5-8 كغ من

الشوفان وكمية مماثلة من التبن. وكان توفير هذا العلف إلى الخيل في المدن خدمة مهمة في سائر المدن الكبيرة في القرن التاسع عشر.

لعوضت كلفة الطاقة العالية التي تستهلكها من خلال قوتها وطول أعمارها.

أما الحيوانات المستخدمة في النقل والعمل الثابت فشملت الحمير الصغيرة والفيلة الضخمة، وفي بعض الأماكن كانت الكلاب تقوم بتدوير الأسياخ المعدنية فوق النار في المطبخ أو تجر العربات الصغيرة أو أحادية العجلة. لكن ليس من الغريب أن تكون الأبقار - الثيران وجواميس الماء وثيران الياك - في مقدمة حيوانات العمل سواء في المزارع أو الأماكن الأخرى بفضل متطلباتها الغذائية المتواضعة. كانت ثيران الياك لا تقدر بثمن بوصفها حيوانات تستخدم في حمل الأثقال، لا بسبب قوتها الهائلة وحسب، بل بسبب قدرتها على السير في الجبال العالية والثلوج. كان أداء الأبقار الأنموذجي في الجر والنقل متوسطاً في أفضل حالاته. فعلى المسافات القصيرة وفوق طرقات جيدة كان بإمكانها أن تجر ما يعادل ثلاثة أو أربعة أضعاف وزنها، لكن عملها الثابت لم يعط أكثر من 300 واط. أما الخيل الهرمة والضعيفة فغالباً ما كانت تستخدم في تدوير الرحى، وهي عصا مثبتة بمحور مركزي للعمل في صناعات صغيرة تحتاج إلى قوة دوران ثابتة، ما كانت تستطيع إعطاء المزيد، وقبل إدخال المحركات البخارية كان كثير منها قد استبدل بالنواعير وطواحين الهواء.

قوة الماء

وضع أنتيباتر التيسالونيكي *Antipater of Thessalonica*، وهو يكتب خلال القرن الأول ق.م. المرجع الأدبي الأول إلى ناعورة مائية بسيطة تُغني عن العمل الشاق المتمثل بالطحن اليدوي (مترجم في برنك 1776، 119):

لا تلمسن الطاحونة أيتها النسوة اللائي يحركن الرحى! استغرقن في النوم العميق بالرغم من أن الديك أذن للفجر، لأن سيريس أوكل إلى الجنيات القيام بالأعمال التي كنتن تقمن بها بأيديكن. إنهن يندفعن من قمة عجلة ويجعلن محورها يدور وهذا، بفضل نصف القطر المتحرك، يشغل وزن أربع طواحين جوفاء. ها نحن ننعم من جديد بطعم حياة الرجال الأوائل، لأننا تعلمنا الاستمتاع بمنتوج سيريس من دون كلل أو ملل.

وباستثناء السفن الشراعية القديمة، فإن تسخير الرياح بدأ في وقت متأخر. ويعد تقرير المسعودي المؤرخ في 947 من أوائل السجلات الموثوقة التي تصف الطواحين الهوائية ذات العمود الشاقولي (فوربيز 1965< هارفرسون *Harverson* أ1991). ويصف المسعودي في تقريره سيستان (في شرقي إيران اليوم) بأنها أرض الرياح والرمال حيث تسوق الرياح الطواحين وترفع الماء من الجداول لتسقي البساتين. إن النماذج المتأخرة لهذه الطواحين القديمة التي لم تتغير - بأشرعتها المصنوعة من القصب المجدول وراء فتحات ضيقة في جدران طينية عالية تسرع جريان الرياح - ظلت تشاهد في الإقليم حتى وقت متأخر من القرن العشرين. لقد انتشر كلا النوعين من الآلات بسرعة كبيرة في طول العالم الوسيط وعرضه، لكن طواحين الماء كانت أكثر بكثير.

ويشهد على سعة انتشارها كتاب يوم الحساب *Domsday Book* لعام 1086 حيث يقول إنه كانت هناك 5.624 طاحونة في جنوب إنجلترا وشرقها، أو واحدة لكل 350 نسمة (هولت *Holt* أ1988). أما أقدم النواعير الأفقية فغالباً ما توصف بأنها النواعير اليونانية أو النرويجية. ومع أن أصل تصميمها يبقى غير مؤكد، إلا أنها راجت كثيراً في العديد من المناطق الأوروبية وفي كل مكان شرقي سورية. إن قوة الصدم الناتجة عن الماء، والتي توجه عادة عبر مجرى خشبي مائل نحو بدالات خشبية مركبة غالباً على دائرة بشكل مائل تدوّر عموداً قوياً يمكن وصله مباشرة بحجر طاحون يدور في الأعلى (الشكل 4-9). هذا التصميم البسيط وغير الكفء نسبياً كان يناسب عمليات الطحن الصغيرة. لكن التصاميم اللاحقة حيث كان الماء يوجه عبر مجرى خشبي مؤنف (ولف *Wulff* أ1966) كانت ذات كفاءة تفوق 50% وقوة قصوى تتجاوز 5.3 ك واط.

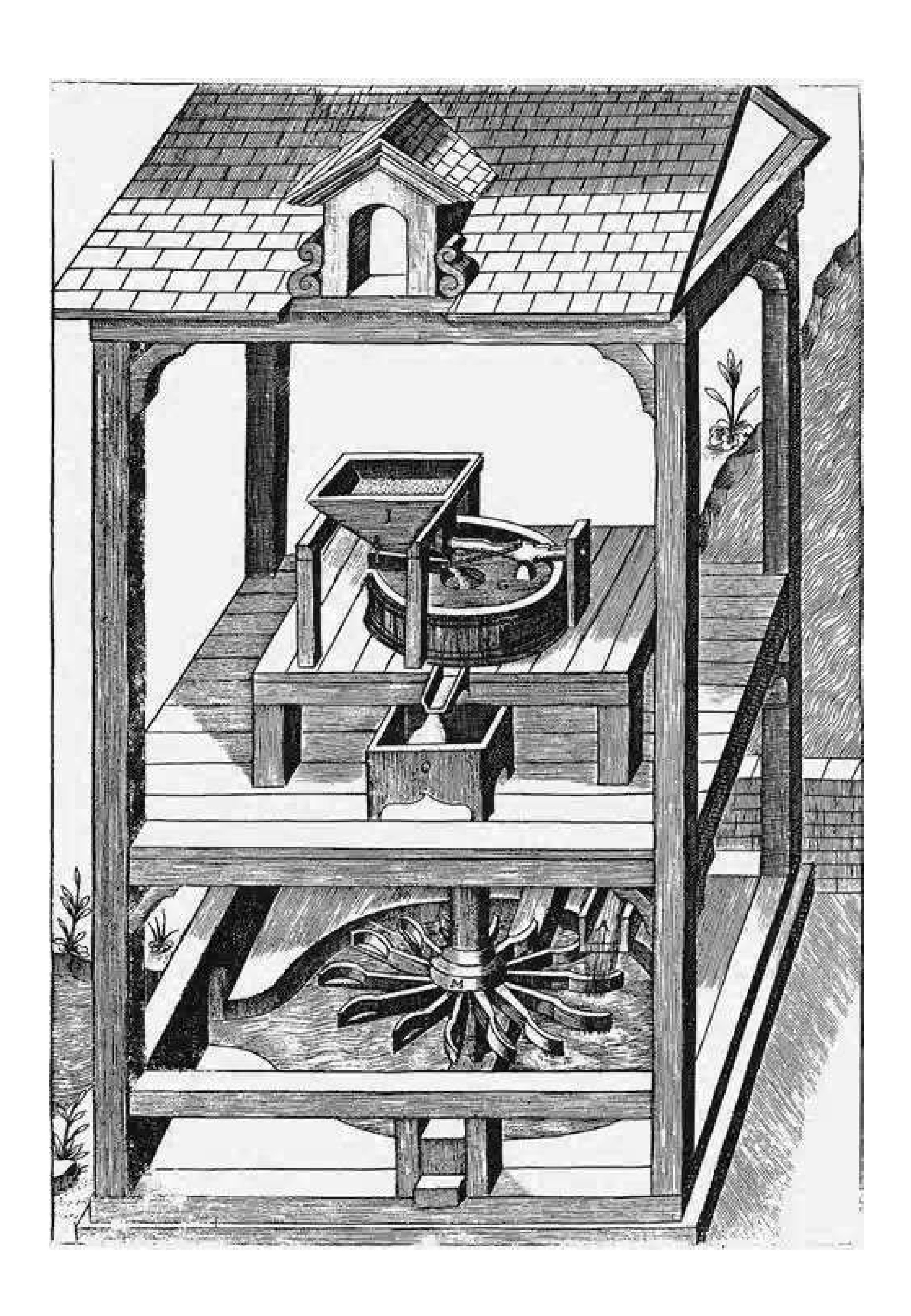
وبفضل كفاءتها العالية حلت النواعير العمودية محل الأفقية. وكانت تحرك الرحى بوساطة تروس مركبة بزاوية قائمة، وأصبحت تعرف في الأدبيات الغربية بطواحين فيتروفيان *Vitruvian* بعد أن قدم البنّاء الروماني أول وصف واضح مؤرخ في 27 ق. م. لما يسمى هايدراليتي *hydraletae*، لكن لويس *Lewis* أ(1997) يرى أن أصل الناعورة يعود إلى النصف الأول من القرن الثالث ق.م. وأغلب الظن أنها ظهرت في الإسكندرية في عهد بطليموس، وأن قوة الماء أصبحت في القرن الأول الميلادي شائعة الاستخدام. على أي حال، ونظراً لسعة انتشارها واستمرارها، صار لدينا كمية كبيرة من المؤلفات التي تعالج تاريخها، وتصميمها، وأدائها واستخداماتها (بريسه *Bresse* أ1876؛ مولر *Müller* أ1939؛ ماير *Meyer* أ1975؛ وايت *White* أ1978؛ رينولدز *Reynolds* أ1983؛ ولفل *Wölfel* أ1987؛ ولتون *Walton* أ2006؛ دني *Denny* أ2007).

لكن التوصل إلى تقييم يوثق به حول إسهام النواعير في توفير الطاقة الأولى في المجتمعات القديمة والوسيطة ضرب من المستحيل. وقد بين ويكاندر *Wikander* أ(1983) أن النواعير كانت أوسع انتشاراً في العصر الروماني ما يعتقد في العادة، ومع أنه لم يمكن التعرف إلا على 20 موقعاً من مواقع طواحين الماء التي تعود لأوائل العصور الوسطى إلا أن هناك 6.500 موقع آخر تضم طواحين تعود إلى إنجلترا في القرن الحادي عشر (هولت *Holt* أ1988). لكن في رأيي أنه حتى التقديرات المتسامحة حول قوة الوحدة وتبني النواعير في طول الإمبراطورية الرومانية

وعرضها، تبين أن قوة الماء لم تسهم إلا بجزء ضئيل من 1% من الطاقة الميكانيكية المفيدة التي قدمها البشر وحيوانات الجر (سميل 2010ج).

تصنف النواعير بحسب نقطة الصدم. فالنواعير العمودية تدور بطاقة التحريك التي يولدها جريان الماء (الشكل 4-10)، وهي تعمل جيداً في جريان بطيء وثابت، لكن يفضل أن يكون الموقع على جداول سريعة الجريان لأن الطاقة القصوى النظرية للناعورة تتناسب مع مكعب سرعة الماء: فمضاعفة السرعة تعطي ثمانية أضعاف الاستطاعة (المربع 4-5). حين حصر جريان الجداول المائية للمرة الأولى، استعملت نواعير برؤوس منخفضة وحسب بين 1.5 و3م ثم أضيفت الفراشات (ألواح خشبية) لاحقاً مع ألواح خلفية لمنع الماء من تجاوز مستوى الطوافات.

ومن الممكن تحسين كفاءة النواعير العمودية من خلال تشكيل القاعدة أسفل إطار الناعورة في صدر ضيق الحجم يعلو قوساً بزاوية 30 درجة عند المركز السفلي



الشكل 4-9

الناعورة الأفقية وتدعى أيضاً بالناعورة الإغريقية أو النرويجية. كانت هذه الناعورة تدار بقوة الصدم المتولدة عن الماء الجاري ما يؤدي مباشرة إلى تدوير حجر الطاحون الموجود في الأعلى. مقتبس من راملي (1976 [1588]).

لزيادة احتباس الماء. أما أكفأ تصاميم النواعير فهو من وضع جان فيكتور بونسيليه (1788-1867) Jean-Victor Poncelet نحو سنة 1800، وكان باستطاعته تحويل نحو 20% من طاقة الماء الحركية إلى قوة مفيدة؛ وفي وقت لاحق من القرن، ارتفع الأداء الأفضل إلى 35-45%. بلغ قطر الناعورة ثلاثة أضعاف رأس النواعير ذات

المربع 4-5

قوة الناعورة العمودية

إن الطاقة الحركية للماء الجاري مقدرة بالجول هي $0.5\rho v^2$ وهي نصف إنتاج كثافتها حيث ρ = 1.000 كغ /م^3) ومربع السرعة (v بالمتر/ثا). ويعادل عدد حجوم وحدات الماء الصادمة للمجاديف (البدالات) في كل وحدة زمنية سرعة الجريان وهكذا فإن القوة النظرية للجدول المائي تعادل حاصل ضرب الطاقة بالسرعة. فالماء الذي يتدفق بسرعة 1.5 م/ثا ويقوم بتدوير الفراشات بمقطع قدره 0.15 م^2 (تقريباً 50x50 سم) يمكنه بوضع مثالي أن يعطي أكثر من 400 واط من القدرة. أما الناعورة الخشبية قليلة الكفاءة التي تعود إلى العصور الوسطى فلا تستطيع أن تنتج أكثر من خمس هذا المعدل أو نحو 80 واط كحركة دورانية مفيدة.

الدواسات (البدالات) وضعفي نواعير بونسيليه إلى أربعة أضعافها.

كانت نواعير الصدر تدار بجريان الماء والسقوط بفعل الجاذبية في جداول مائية ذات رؤوس تتراوح بين 2م و5م. وكانت أعمال الصدر الضيقة التي تمنع الماء من التسرب قبل الأوان ضرورية لجودة الأداء. ليست التصاميم منخفضة الصدر، حيث يدخل الماء من أسفل مرتفع القلب المركزي، أكفأ من النواعير المصممة جيداً . أما الآلات عالية الصدر، حيث يصدم الماء فوق مرتفع القلب المركزي، فتقترب من مخرجات النواعير ذات الصناديق. أما النواعير التقليدية التي يسقط الماء عليها من الأعلى فتعمل أساساً بوساطة طاقة الجاذبية الكامنة، وبرؤوس تتجاوز 3 م،

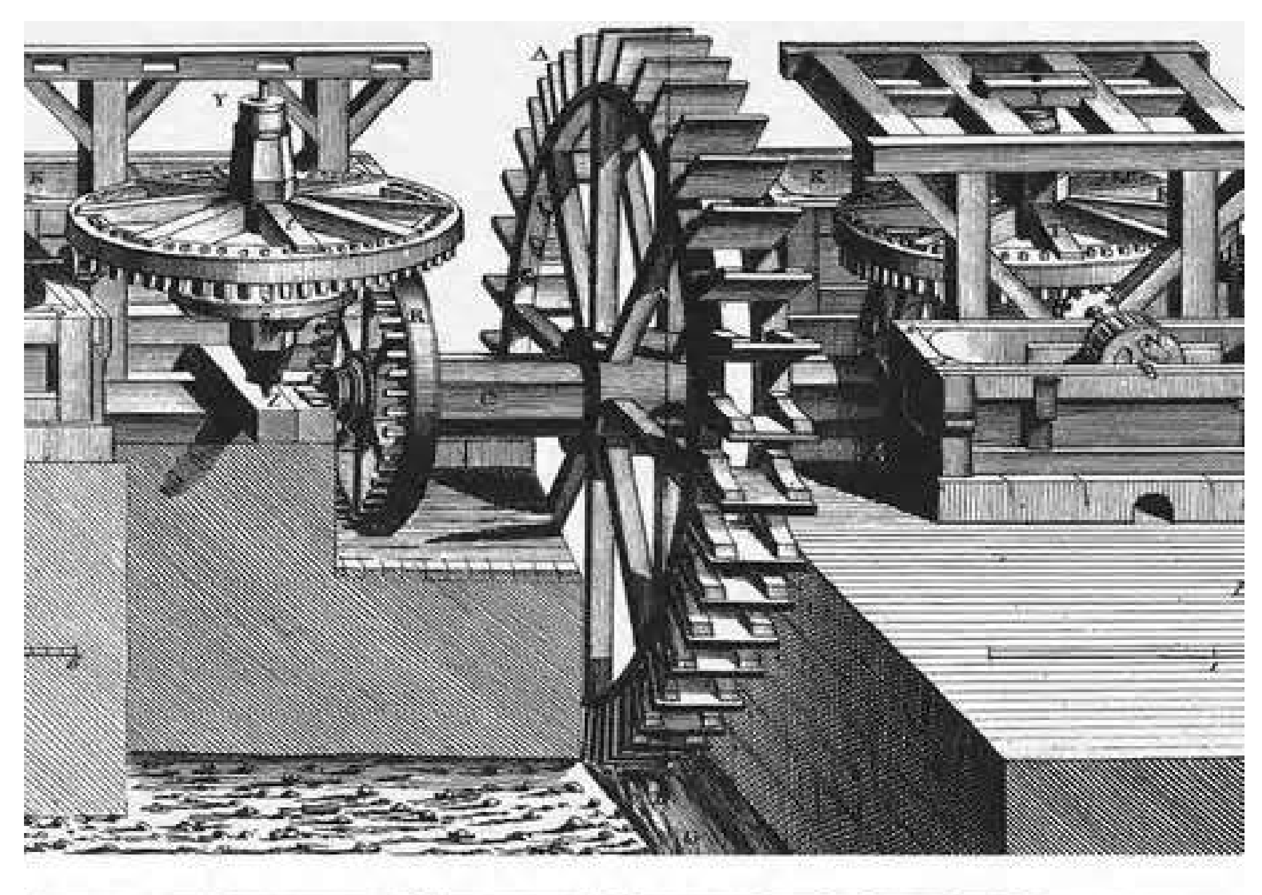
كما أن أقطارها تساوي ثلاثة أرباع الرأس (الشكل 4-10). فالماء يدخل عبر مجار خشبية أو أقماع ليملأ صناديق تشبه الدلاء بمعدل يقل عن 100 ل/ثا وبسرعة 4-12 دورة في الدقيقة. وحيث إن معظم العزم الدوراني يتولد عن سقوط الماء، فإن من الممكن تركيب الناعورة الفوقية على جداول مائية بطيئة الجريان (المربع 4-6).

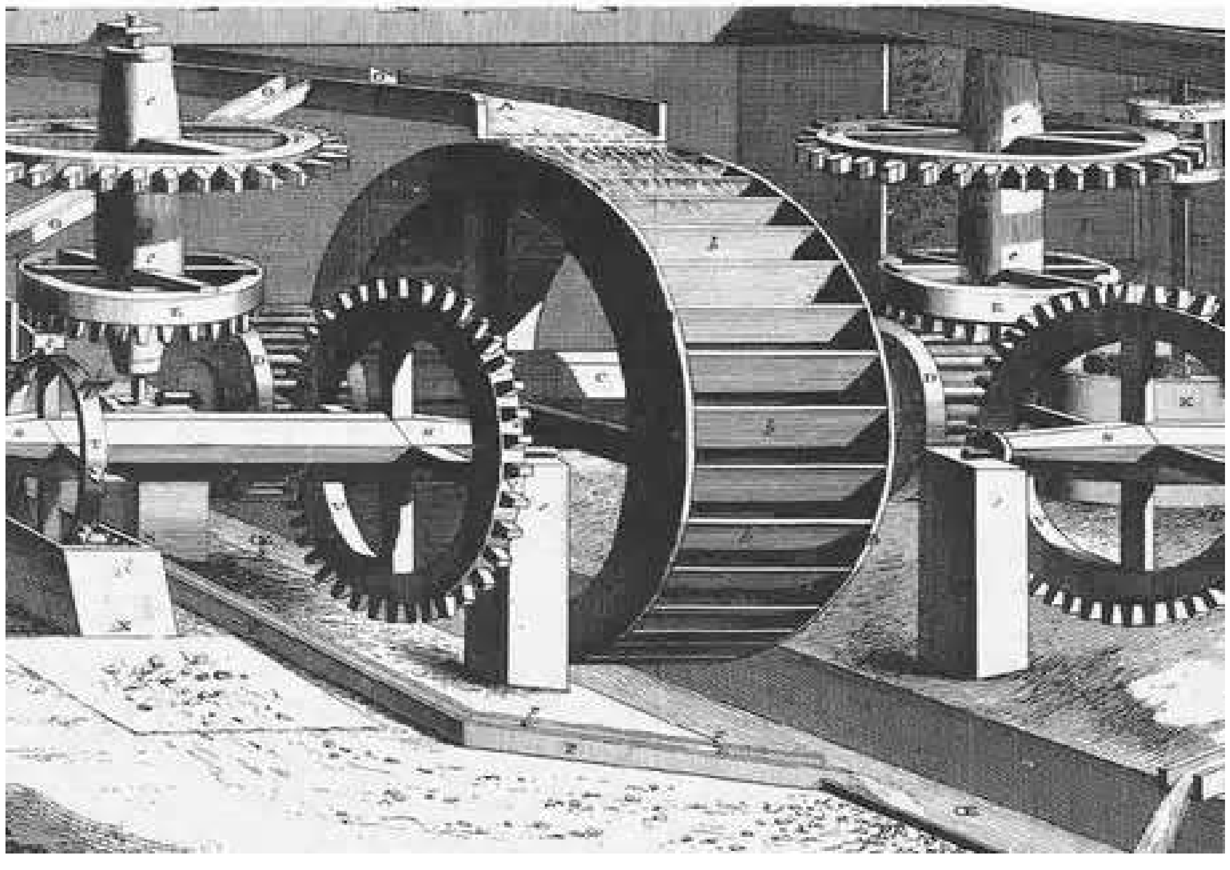
هذه الميزة تعطلت جزئياً بسبب الحاجة إلى التزود بالماء بانتظام وبتوجيه جيد، وهذا ما استدعى بناء أحواض التخزين والقنوات المائية على الدوام. فالنواعير التي يسقط عليها الماء من الأعلى والتي تتمتع بسعة حمل كبيرة، أي التي لا تخسر الدلاء فيها كثيراً من الماء المنسكب، يمكن أن تكون أكفأ، ولو أنها أضعف من الآلات تحت الجريان الكامل. وحتى العقود الأولى من القرن الثامن عشر، كانت النواعير العلوية تعد أقل كفاءة من السفلية (راينولدز 1979). لكنه ثبت هذا الخطأ في خمسينيات القرن الثامن عشر في كتابات أنطوان دي بارسيو *Antoine de Parcieux* ويوهان ألبرخت أويلر *Johann Albtecht Euler* وبالدرجة الأولى من خلال التجارب الدقيقة على نماذج مقياسية أجراها جون سميتون *John Smeaton* ا(1724-1792) الذي قارن قدرات النواعير بقدرات وسائط التحريك الأولى الأخرى (سميتون 1759).

ساعد ترويج سميتون اللاحق للناعورة العلوية على الإبطاء من انتشار المحركات البخارية، كما رسخت تجاربه (حين استنتج - وكان استنتاجه صحيحاً - أن قوة الناعورة تزداد بمكعب سرعة الماء) مقياس كفاءة خاصاً بالنواعير عند 52-76% بالمقارنة مع 32% لأفضل النواعير السفلية (سميتون 1759).

وقد تمخض تحليل دني النظري الحديث لكفاءة الناعورة عن نتائج مشابهة: 71% من النواعير العلوية، 30% من النواعير السفلية (ونحو 50% لنواعير بونسيليه). وعملياً نرى أن للنواعير جيدة التصميم والصيانة في القرن العشرين كفاءات كامنة تبلغ 90% وتستطيع تحويل 85% من طاقة الماء الحركية إلى عمل مفيد (مولر وكاوبيرت Kauppert ا2004)، لكن بصورة عامة كان المعدل الممكن 60-70%، في حين أن أفضل النواعير السفلية الألمانية المصنوعة بأكملها من المعدن والتي صممت وصنعت في ثلاثينيات القرن العشرين لم تتجاوز كفاءتها 76% (مولر 1939).

من الممكن إقامة النواعير السفلية في مجرى الماء مباشرة لكن مثل هذا الموقع يزيد بالطبع من فرص تعرضها للتلف بسبب الفيضانات. كانت نواعير الصدر والنواعير السفلية بحاجة إلى ماء يجري بانتظام. وعادة ما يتألف المجرى الفرعي من سد يقام على الجدول وقناة تحول المجرى إلى الناعورة. وفي المناطق ذات الأمطار القليلة أو





الشكل 4-10

صور لناعورة ضخمة تدير معمل ورق ملكياً فرنسياً (في الأعلى) ولناعورة تدير آلات غسيل المعدن الخام في مصهر للمعادن (في الأسفل). مقتبسة من الموسوعة (*Encyclopédie* ديدرو ودالامبير 1769-1772).

المربع 4-6

قوة النواعير العلوية

تعادل القوة الكامنة للماء (مقدرة بالجول) *mgh* انتاجاً كتلته (بالكيلوغرام) وتسارع الجاذبية (9.8 م/ثا2) والرأس (الارتفاع بالمتر). وبهذا يكون لدلو في ناعورة علوية يحتوي على 0.2 م^3 من الماء (200 كغ) وموضوع على ارتفاع 3 م فوق قناة التصريف طاقة كامنة تساوي 6 كيلو جول تقريباً. ومع معدل جريان 400 كغ/ثا يكون للناعورة قدرة نظرية تعادل تقريباً 12 كيلو واط. أما القوة الميكانيكية المفيدة لمثل هذه الآلة فهي بين 4 كيلو واط بالنسبة إلى ناعورة خشبية ثقيلة وأكثر من 9 كيلو واط بالنسبة إلى آلة معدنية جيدة الصنع، حسنة التشحيم يعود تاريخها إلى القرن التاسع عشر.

غير المنتظمة، كان من المألوف حجز الماء في أحواض أو وراء سدود قليلة الارتفاع. ومن الضروري إقامة مجارٍ ناعمة تمنع تراكم الوحل في القناة مع الحرص على إعادة الماء الجاري إلى النهر، لأن تجمع الماء يعيق دوران الناعورة. وفي إنجلترا، كانت النواعير، ومحاور الدوران، والمسننات حتى بداية القرن الثامن عشر خشبية بالكامل تقريباً. بعدئذ بدأ استخدام الحديد الصب في صنع الأقراص والمحاور. وصنعت أول ناعورة حديدية بالكامل في أوائل القرن التاسع عشر (كروسلي Crossley ا1990). وبالإضافة إلى النواعير الثابتة كانت هناك أيضاً نواعير طافية أقل شيوعاً وكانت تقام على الصنادل وطواحين المد. أقيمت طواحين الحبوب الطافية بنجاح للمرة الأولى على نهر التايبر عام 537 حين حوصرت روما من قبل القوطيين الذين قطعوا ماء القناة الذي كان يشغل الطواحين.

كانت مشهداً مألوفاً في مدن أوروبا العصور الوسطى أو قربها، وقد بقي كثير منها حتى وقت متأخر من القرن الثامن عشر. وقد وثق استعمال القوة المتقطعة من ماء البحر للمرة الأولى في

البصرة Basra في القرن العاشر. في العصور الوسطى بنيت في إنجلترا وهولندا وبريتاني طواحين صغيرة تعمل بطاقة المد كذلك على ساحل الأطلسي لشبه جزيرة أيبيريا؛ بعدها جاء إنشاؤها في أمريكا الشمالية والكاريبي (مينشينتون Minchinton وميغز Meigs ا1980). ولعل أهم آلية تعمل بقوة المد وأطولها عمراً كانت تمد لندن بماء الشرب. كانت أول نواعير عمودية ضخمة تعمل بقوة المد بنيت بعد 1582، وقد دمرها حريق لندن الكبير عام 1666، لكن النواعير التي حلت محلها ظلت تعمل حتى عام 1822 (جنكينز *Jenkins* ا1936). كانت هناك ثلاث نواعير تعمل بالماء الذي يجري عبر القناطر المستدقة لجسر لندن القديم تعمل بكلا الجهتين (بينما كانت النواعير الأخرى تعمل عادة مع انحسار المد) وكانت تغذي 52 مضخة تضخ 600.000 ل من الماء إلى ارتفاع 36 م.

ظل طحن الحبوب الاستخدام المهيمن لقوة الماء: ففي إنجلترا العصور الوسطى كانت تقوم بنحو 90% من جميع عمليات الطحن، ومعظم ما تبقى كان يستخدم في صنع الأقمشة (بنفش الأصواف وتسميكها) و1% فقط للنشاطات الصناعية الأخرى (لوكاس 2005). شهدت أواخر العصور الوسطى استعمالات واسعة النطاق لقوة الماء في سحق الفلزات وصهر المعادن (أفران الصهر) وفي نشر الحجر والخشب وخراطة الخشب وعصر الزيت وصنع الورق ودبغ الجلود وسحب الأسلاك والبصم والقطع وسحق المعادن والحدادة وتلميع الميوليق (الخزفيات الإيطالية) *majolica* والصقل. كما استعملت النواعير الإنجليزية في اللف وضخ الماء في المناجم تحت الأرض (ودول *Woodall* ا1982؛ كلافرنغ *Clavering* ا1995).

كل هذه الأعمال كانت تتم باستعمال النواعير بكفاءة أكبر من كفاءة البشر أو الحيوانات وبإنتاجية عمل زادت بكثير عن ذي قبل. أضف إلى ذلك أن شدة القدرة التي وفرتها النواعير واستمرارها وإمكانية الاعتماد عليها فتحت إمكانيات إنتاجية جديدة. وكان هذا صحيحاً بنحو خاص بالنسبة إلى المناجم والتعدين. وبالفعل، فإن أسس الطاقة الخاصة بالتصنيع الغربي تقوم إلى حد بعيد على هذه الاستعمالات التخصصية للنواعير. فعضلات الإنسان والحيوان تعجز عن تحويل الطاقة بمثل هذه المعدلات العالية والمركزة التي يعتمد عليها - لكن مثل هذه المنتجات وحدها كان باستطاعتها زيادة معدلات صناعات مثل الصناعات الغذائية وسرعتها وجودتها. ومع هذا استغرقت النواعير المثالية زمناً طويلاً حتى وصلت إلى كفاءة تفوق قوة فرق الحيوانات الكبيرة المقيدة بالنير.

على مدى قرون ظلت الطريقة الوحيدة للحصول على مخرجات طاقة أكبر هي تركيب سلسلة من وحدات أصغر في مواقع ملائمة. وأفضل مثال معروف لهذا التركيز هو خط المطاحن الرومانية الشهير في باربيغال على مقربة من آرل *Arles* التي تضم 16 ناعورة استطاعة كل منها نحو 2 ك واط بمجموع يزيد قدره قليلاً عن 30 ك واط (سلين *Sellin*، ا1983). وقد دعاها غرين (2000، 39) «أضخم تركيز للقوة الميكانيكية في العالم القديم» ووصفها هوج *Hodge* ا(1990، 106) بأنها «شيء - بحسب كل الكتب المدرسية - لاوجود له البتة - مصنع روماني قديم، حقيقي، يعمل بالقدرة المائية، للإنتاج بالجملة، على خط التجميع». لكن نظرة عن كثب تبين واقعاً مختلفاً (المربع 4-7).

على أي حال بقيت المطاحن المائية الكبيرة نادرة على مدى القرون التالية. فحتى في العقود الأولى من القرن الثامن عشر كان متوسط استطاعة النواعير الأوروبية أقل من 4 كيلو واط. ولم يتخط 7 ك واط سوى بضع آلات، كما أدى ضعف التروس (عامل الاحتكاك الكبير) إلى ضعف كفاءات التحويل. وحتى أكثر الآلات إثارة للإعجاب آنذاك - 14 ناعورة ضخمة (قطرها 12 م) أقيمت على نهر السين في مارلي بين 1680 و1688 - لم تستطع الوفاء بالمهمة المتمثلة في ضخ الماء لـ 1.400 نافورة وشلال في قصر فرساي. كانت القدرة الكامنة للموقع 750 ك واط، لكن قلة كفاءة نقل الحركة الدورانية (من خلال استعمال عصي التبادل) قللت المخرجات المفيدة إلى 52 ك واط وحسب، وهذا لا يكفي لتزويد كل نافورة بالماء (براندستتر *Brandstetter* ا2005).

لكن حتى النواعير الصغيرة كان لها أثر اقتصادي كبير. وحتى عند افتراض أن الدقيق يشكل نصف الغذاء اليومي للفرد العادي، فإن مطحنة مائية صغيرة يقوم بتشغيلها أقل من عشرة عمال تطحن من الدقيق في اليوم (10 ساعات من أعمال

المربع 7-4

نواعير باربيغال

تحول مجرى الماء اللازم لتغذية النواعير العلوية الست عشرة في باربيغال (أغلب الظن أنها بنيت في أوائل القرن الثاني الميلادي) من قناة مائية قريبة إلى قناتين على منحدر يميل ثلاثين درجة (بنوا *Benoit* ا1940). أما ساغوي *Sagui* فاستعمل فرضية بعيدة كل البعد عن الواقع (جريان ماء بسعة 1.000 ل/ثا، سرعة تبلغ 2.5 م/ثا، متوسط إنتاجية 24 طناً من الدقيق يومياً) ليستنتج أن المؤسسة كانت تنتج من الدقيق ما يكفي لصنع الخبز لـ 80.000 نسمة. لكن سلين (1983) استخدم أرقاماً أقرب إلى الواقع (جريان ماء سعة 300 ل/ ثا، سرعة نحو 1 م/ ثا) وقد رأى أن لكل ناعورة استطاعة مفيدة تصل إلى 2 ك واط بحيث يكون الإجمالي 32 ك واط (بعامل استطاعة 50%) وهكذا يكون الإنتاج اليومي 4.5 طن من الدقيق.

لكن سالين تبنى افتراض ساغوي الذي يرى أن 65% من الطاقة الحركية للماء تتحول إلى طاقة حركية لدوران الرحى - في حين أن حسابات سميتون (1759) الدقيقة تقدر بأن 63% هي أقصى درجات الكفاءة لتصاميم أفضل لنواعير القرن الثامن عشرالعلوية. إن الجمع بين الجريان الأخفض - يعتقد ليفو *Leveau* ا(2006) أنه يبلغ 240 أو 260 ل/ ثا - وكفاءة أخفض (لنقل 55%) تترجم إلى 1.5 ك واط/ وحدة. وهذا يساوي القوة المجتمعة لثلاثة (أو أربعة) أحصنة رومانية مكدنة لتدوير الرحى وتكفي لإنتاج نحو 3.4 طن من الدقيق يومياً ما يكفي لإطعام 11.000 نسمة: وهذا بالتأكيد أداء أعلى من الطواحين العادية في القرن الثاني الميلادي لكن أقل من الأنموذج الأولي للإنتاج بالجملة.

الطحن) ما يكفي لإطعام 3.500 فرد - أي مدينة متوسطة الحجم من مدن العصور الوسطى، في حين أن الطحن اليدوي يتطلب 250 عاملاً. وبعد إدخال تصميم الآلات الإبداعي أحدثت النواعير في القرن الثامن عشر فارقا كبيراً في الإنتاجية. ومن الأمثلة الكاملة إدخال الآلات التي تعمل بطاقة الماء لقطع 200.000 مسمار وترويسها يومياً، وقد منحت براءة اختراع هذه الآلة في الولايات المتحدة عام 1795 (روزنبيرغ Rosenberg ا1975). هذا الاستخدام الواسع لهذه الآلات خفض أسعار المسامير بنسبة 90% تقريباً في السنوات الخمسين التالية.

كانت النواعير أكفأ محولات الطاقة التقليدية، إذ أثبتت تفوقها حتى لدى مقارنتها بأفضل المحركات البخارية التي استطاعت تحويل 2% من الفحم إلى قوة مفيدة في عام 1780، ولم تكن تتجاوز 15% حتى في نهاية القرن التاسع عشر (سميل 2005). فما من آلة تحريك أولية تقليدية استطاعت إنتاج قوة مستمرة بهذا القدر. كانت النواعير لا غنى عنها في بدايات عصر الصناعة في أمريكا وأوروبا، حيث بلغت أوج استخدامها -سواء أكان تقييمها بحسب قدرتها المنفردة أو الإجمالية أو بحسب كفاءة تصميمها- في القرن التاسع عشر، في الوقت الذي كانت في المحركات البخارية تستعمل لأغراض ثابتة جديدة أو في النقل، وظهور وسيلة التحريك الجديدة وسيطرتها لاحقاً طغى على أهمية الطاقة المائية.

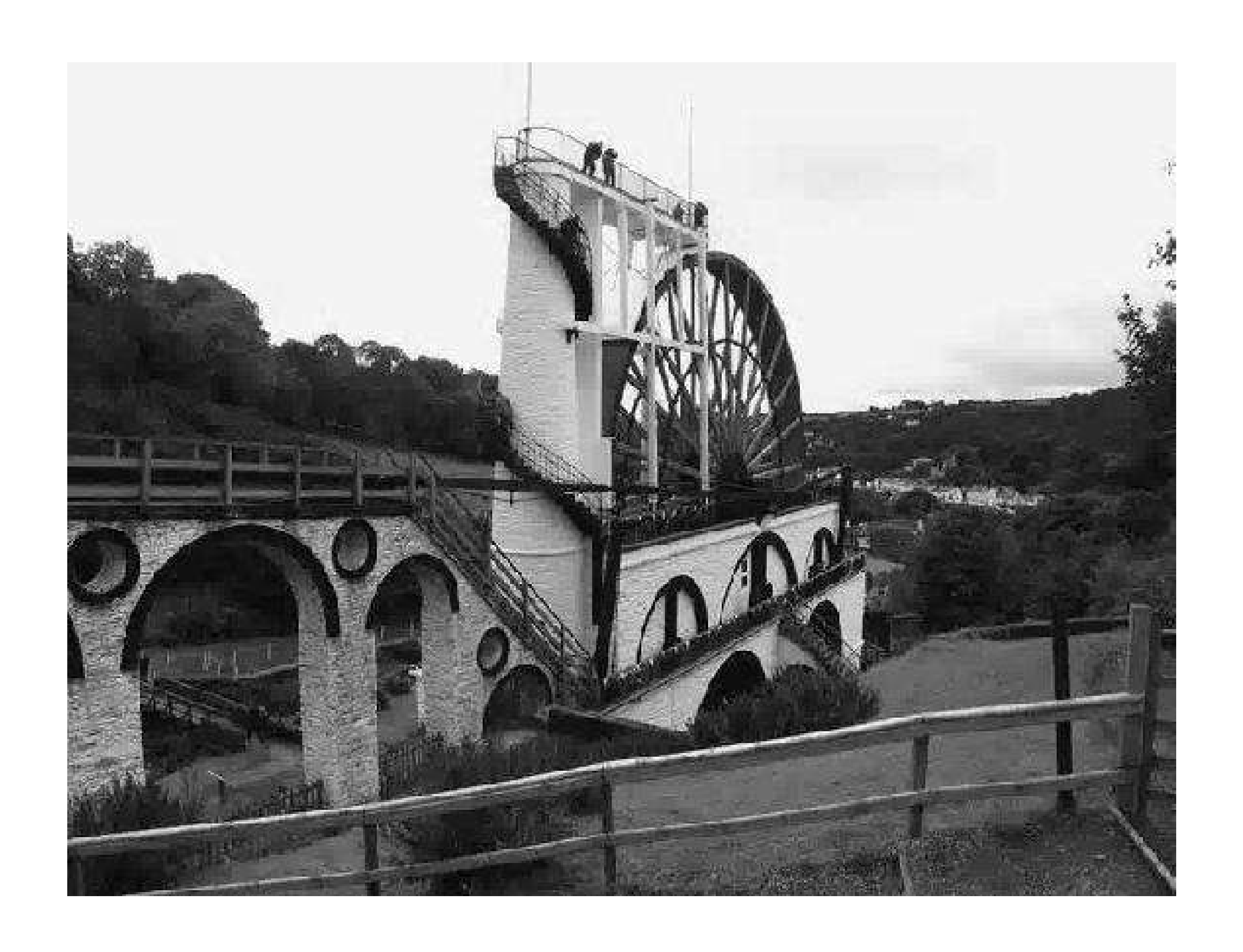
غير أن العقود الستة الأولى من القرن التاسع عشر شهدت زيادة في القدرة المائية أكثر من أي وقت مضى، واستمرت غالبية هذه الآلات بالعمل بالرغم من أن القوة البخارية، وفيما بعد الكهربائية، كانت تغزو أسواق وسائل التحريك الأولية. وقدر دوخرتي ***Daugherty*** ا(1927) أنه في الولايات المتحدة في عام 1849 كان إجمالي القدرة المركبة في النواعير 500 ميغا واط تقريباً (<7% من كل وسائل التحريك الأولية، بما فيها الحيوانات العاملة لكن ما عدا العمالة البشرية) بالمقارنة مع نحو 920 ميغا واط من القدرة المثبتة في المحركات البخارية. إن مقارنة العمل الفعلي المنجز يوضح المسألة أكثر: فقد استنتج شور *Schurr* ونيتشيرت *Netschert* ا(1960) أنه في عام 1850 تمكنت النواعير في الولايات المتحدة من توليد 2.4 PJ أي أكثر من إجمالي المحركات البخارية التي تعمل بالفحم بنسبة 2.25؛ حتى إنها كانت لا تزال متقدمة (بنسبة 30%) عام 1860؛ وأن قوة البخار لم تتمكن من تخطي عملها المفيد إلا في أواخر الستينيات من القرن التاسع عشر. وفي 1925، كانت 33.500 ناعورة تعمل في ألمانيا (مولر وكاوبيرت 2004)؛ كما أن بعض النواعير الأوروبية ظلت تعمل حتى ما بعد عام 1950.

في القرن التاسع عشر اعتمدت مصانع النسيج الضخمة على القوة المائية اعتماداً كبيراً. فعلى سبيل المثال، افتتحت شركة صناعات مريماك، وهي أول شركة مدمجة لصنع الأقمشة (أقمشة كاليكو القطنية البيضاء بصفة رئيسة) عام 1823 في لويل، ماساتشوستس واعتمدت على نحو 2 ميغا واط من القوة المائية من شلال ضخم (10 م) في نهر ميريماك (مالون *Malone* ا2009). بحلول عام 1840 ضم أكبر تجمع بريطاني - الأعمال المائية لشو بطاقة 1.5 ميغا واط في غرينوك بالقرب من غلاسكو على نهر كلايد - 30 ناعورة بنيت في صفين على منحدر شديد وكانت تتغذى من خزان ضخم. كان قطر أكبر النواعير 20 م تقريباً وعرضها 4-6 م واستطاعتها تجاوزت 50 ك واط (ودول 1982).

عرفت أكبر ناعورة في العالم باسم السيدة إيزابيلا، وهي من تصميم روبرت كايسمنت *Robert Casement* وقد بنتها عام 1854 شركة لاكسي العظمى للتعدين *the Great Laxey Mining Company* في جزيرة مان لتضخ الماء من مناجم لاكسي. كانت الناعورة تدار بالدفع العلوي (2.5 دورة في الدقيقة) وقطرها يبلغ 21.9 م وعرضها 1.85 م؛ وطول كل من أوتادها (أعتابها) الخشبية وعددها 48 (9.75 م). أما القلب (المحور) وعوارض السحب القطرية فمصنوعة من الحديد الصب (راينولدز 1970). كانت كل السواقي على المنحدر فوق الناعورة موجهة نحو خزانات التجميع، حيث يضخ الماء في قاعدة الكفت الحجري ويصعد في المجرى الخشبي. وتنتقل الحركة إلى وتد المضخة فتصل إلى عمق 451 م إلى قعر بئر منجم الرصاص - الزنك، بوساطة كرنك محوري رئيس و180 م من الأوتاد الخشبية الموصلة. كانت ذروة القوة النظرية للناعورة نحو 427 ك واط. واستطاعت في عملها المعتاد توليد نحو 200 ك واط من القوة المفيدة. استمرت الناعورة في العمل حتى عام 1926 وأعيد ترميمها بعد عام 1965 (التراث الوطني في مانكس 2015) (الشكل 4-11).

لكن عصر النواعير الضخمة لم يعَمَّر طويلاً. فحين كانت هذه الآلات تقام في النصف الأول من القرن التاسع عشر، أحدث تطوير العنفات المائية التطور الجذري الأول في وسائط التحريك الأولية منذ اختراع الناعورة العمودية قبل قرون عدة. بنيت أول عنفة تعمل برد الفعل من عنفات بنوا فورنيرون Benoît Fourneyron بجريان خارجي محيطي عام 1832 لتشغيل مطارق الحدادة في فريزان Fraisans. حتى بوجود رأس منخفض جداً لا يتجاوز 1.3 م وقرص دوار قطره 2.4 م فإن استطاعتها بلغت 38 ك واط. بعد ذلك بخمس سنين حققت آلتان محسنتان تعملان في مصنع الغزل في سان بليزيان معدلاً بلغ 45 ك واط تحت رأسين ارتفاع الأول 108م والثاني 114 م (سميث 1980).

سرعان ما تراجع أداء آلة فورنيرون لمصلحة التصميم المبدع لعنفة ذات جريان داخلي، وهي منتج دعاه لايتون Layton ا(1979) الأنموذج الأول لمنتج أبحاث صناعية، لكنه يعرف اليوم باسم عنفة فرنسيس نسبة إلى المهندس البريطاني



الشكل 4-11

ناعورة لاكسي العظمى بعد ترميمها (Corbis).

الأمريكي جيمس ب. فرنسيس (1815-1892). بعدئذ ظهرت عنفات ليستر أ. بلتون Lester A. Pelton التي تعمل بالدفع النفاث والتي منحت براءة الاختراع عام 1920، والعنفات ذات الدفق المحوري من أنموذج فيكتور كابلان في 1920. وحلت تصاميم العنفات الجديدة محل النواعير بصفتها وسائل التحريل الأولية في كثير من الصناعات. فعلى سبيل المثال، بحلول عام 1875 ولدت العنفات 80% من الاستطاعة الثابتة في ماساتشوستس، وكان ذلك التاريخ في أقصى درجات الأهمية للآلات التي تعمل بالماء في مجتمع يتجه نحو التصنيع.

فمثلاً، كان في كل من مصانع النسيج الثلاثة الكبرى في نهر مريماك الأدنى في ماساتشوستس وجنوب هامبشير، لويل ولورنس ومانشستر آلات مائية تنتج ما مجموعه 7.2 ميغا واط. وكان في حوض النهر بالكامل نحو 60 ميغا واط من الاستطاعة الثابتة بمعدل 66 ك واط لكل مؤسسة إنتاج (هنتر 1975). وحتى منتصف الخمسينيات من القرن التاسع عشر كان البخار في نيو إنجلاند أغلى كوسيلة تحريك أولية من الماء بثلاثة أضعاف. لكن عصر العنفات المائية كوسائل تحريك أولية تدور المحاور ذات التروس والسيور الجلدية انتهى فجأة. في عام 1880 صار البخار بفضل استخراج الفحم الحجري على نطاق واسع وزيادة كفاءة المحركات أرخص من الطاقة المائية في كل مكان في الولايات المتحدة. وقبل نهاية القرن التاسع عشر كانت معظم العنفات المائية قد توقفت عن إنتاج الطاقة المباشرة وبدأت في تدوير المولدات الكهربائية.

قوة الرياح

تولت المراجعات الوطنية العامة والخاصة تغطية تاريخ تسخير الرياح لتوليد الطاقة الثابتة (مقابل التاريخ الأطول لتحويل الرياح إلى حركة باستعمال الأشرعة الذكي) وتطوير الطواحين الهوائية التي صممت لتكون آلات معقدة وقوية في بدايات العصر الصناعي. ومن الإسهامات المهمة في الفئة الأولى نجد أعمال فريز Freese ا(1957)، نيدام (1965) رينولدز (1970) مينشينتون (1980) ودني (2007). ومن الدراسات المسحية المهمة نذكر أعمال سكيلتون (1947)، ويلز (1975) عن المطاحن البريطانية، وبونيبرغ (1952)، ستوكهيوزن (1963) وهسليج (1965) عن التصاميم الهولندية التي كثر الحديث عنها، وولف (1900)، توري (1976)، بيكر (2006) ورايتر (2008) عن الآلات الأمريكية التي لعبت دوراً رئيساً، ولو أنه لم يلق كثيراً من التقدير، في فتح الغرب. صارت طواحين الهواء أقوى وسائل التحريك الأولية في العصر ما قبل الصناعي في الأراضي المنبسطة، حيث أعاق شح المصادر المائية بناء النواعير الصغيرة (في هولندا والدنمارك وبعض أجزاء إنجلترا) وفي عدد من المناطق الآسيوية والأوروبية حيث تهب رياح موسمية قوية.

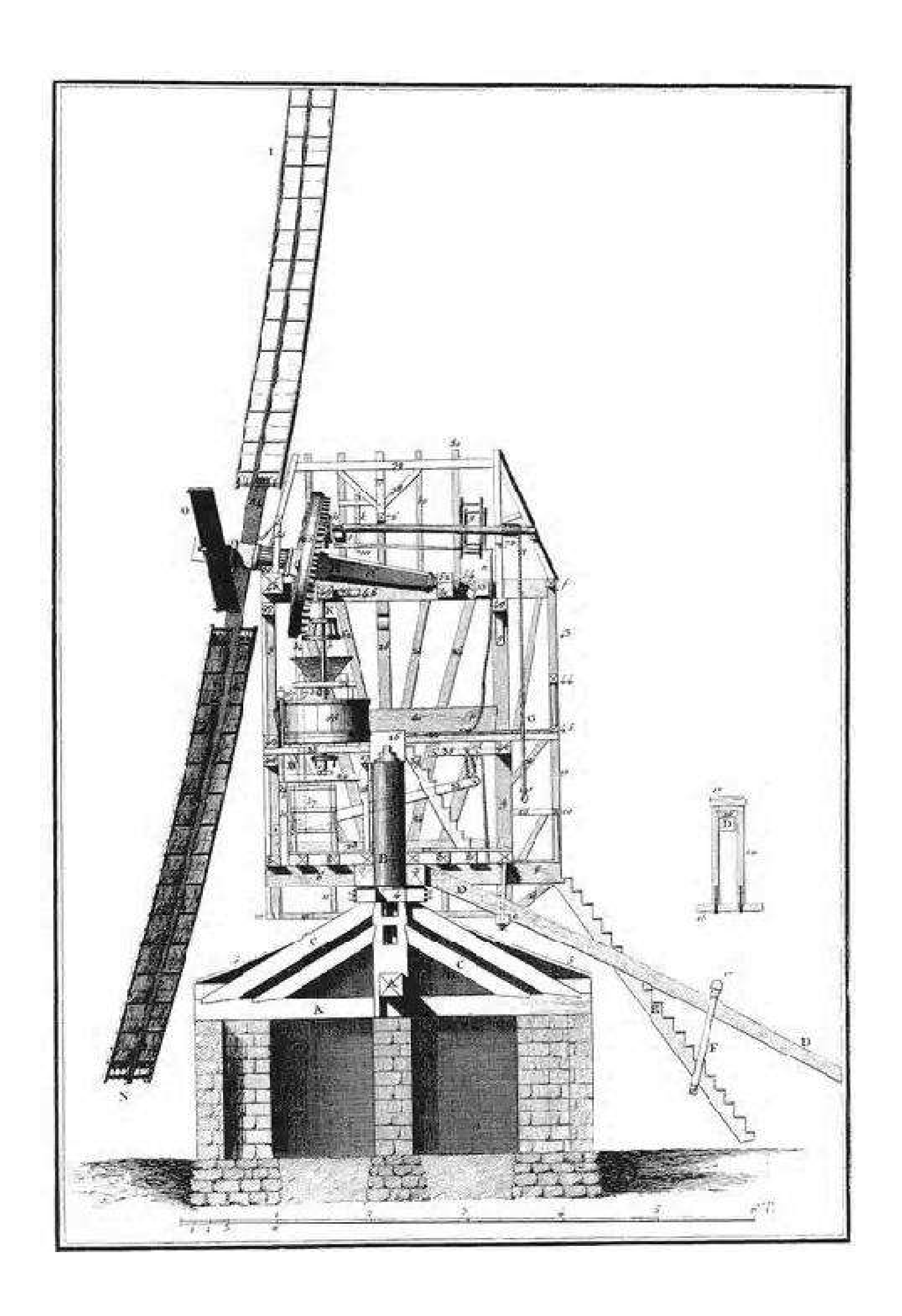
لكن إسهام طواحين الهواء في التكثيف الاقتصادي العالمي لم يرق إلى مستوى إسهام النواعير المائية لأن استعمالها في نهاية المطاف لم ينتشر إلا في أجزاء من أوروبا الأطلسية. ويأتينا أول سجلات واضحة عن طواحين الهواء الأوروبية من العقود الأخيرة من القرن الثاني عشر. وبحسب لويس (1993) فإن استعمالها انتشر أولاً من إيران إلى الأراضي البيزنطية، حيث تحولت إلى آلات عمودية وجدها الصليبيون. وعلى عكس الآلات الشرقية التي تدور أشرعتها في مستوى أفقي حول محور عمودي، كانت هذه الطواحين تدور عمودياً على محور أفقي يمكن توجيهه مقابل الرياح. وباستثناء الطواحين الشراعية الثماني الأيبيرية التي تعمل بقماش مثلث (وهذا استقدم من شرقي البحر الأبيض المتوسط)، كانت الآلات الأوروبية الأولى كلها طواحين تدور حول محاورها، وبنيتها الخشبية، وصناديق مسنناتها، وأحجار الرحى كلها تدور حول عمود مركزي ضخم يستند إلى أربع عوارض قطرية (الشكل 4-12). ونظراً لعدم استطاعتها أن تغير اتجاهها تبعاً لتحول اتجاه الريح فقد كان لا بد من تحويلها لمواجهة الرياح، بالإضافة إلى عدم قدرتها على

مواجهة الرياح القوية وتعرضها للتهشم بفعل العواصف، هذا بصرف النظر عن أن قلة ارتفاعها النسبي حد من ذروة أدائها (المربع 4-8).

في الوقت الذي كانت فيه طواحين الهواء ذات العمود مستمرة في العمل في شرقي أوروبا حتى القرن العشرين، كانت تستبدل تدريجياً في أوروبا الغربية لمصلحة الطواحين البرجية والطواحين السموكية (ذات الأضلاع الثمانية)[22]. في كلا هذين التصميمين كان الغطاء العلوي فقط هو الذي يوجَّه نحو الرياح إما من الأرض أو، في حالة الأبراج، من الصالة. كان لطواحين سموك هيكل خشبي له في العادة أضلاع ثمانية مغطاة بألواح خشبية أو صفائح متراكبة. أما الطواحين البرجية فهي أبنية مستديرة ومستدقة بصفة عامة. ولم تبدأ أشرعة الطاحون بالتوجه آلياً نحو الرياح إلا بعد عام 1745 حين أدخل الإنجليز الذيل المروحي ليغذي ترس الرياح. ومن الغريب أن الهولنديين الذين كانوا يملكون أكبر عدد من الطواحين في أوروبا لم يتبنوا هذا الاختراع إلا في باكورة القرن التاسع عشر.

لكن الطحانين الهولنديين أحرزوا قصب السبق في إدخال تصاميم شفرات أكفأ. فبدأوا في نحو عام 1600 بإضافة ألواح مائلة حوافها إلى الشفرات المستوية السابقة. وقد أعطى التقوس الناتج مزيداً من القوة الرافعة للشفرات وقلل المقاومة. وضمت المخترعات التالية تحسينات في تركيب الأشرعة وصنع المسننات من المعادن المصبوبة وإضافة جهاز تحكم يعمل بالقوة النابذة. وقد ساعد هذا الجهاز على الاستغناء عن ضبط الأشرعة بحسب سرعة الرياح، وهي مهمة شاقة لا تخلو من الأخطار. وبنهاية القرن التاسع عشر كان الإنجليز قد بدأوا بتركيب صفائح هوائية حقيقية وهي شفرات ثخينة حوافها صممت وفق مبادئ الديناميكا الهوائية. كان طحن الحبوب وضخ المياه (وعلى السفن أيضاً مع آلات محمولة صغيرة) التطبيقات الأكثر انتشاراً. استخدمت طواحين الهواء في أوروبا والعالم الإسلامي في الطحن والجرش (الجص، وقصب السكر، والخردل، والكاكاو) وفي صنع الورق وقطع الخشب والحدادة (هيل 1984).

صحيح أن الناس في هولندا فعلوا كل هذه الأشياء، لكن تجفيف الأراضي المنخفضة في البلاد واستصلاح الأراضي وزراعتها كان أكبر منجزاتهم. ويعود



الشكل 12-4

طاحونة عمود هوائية. كان العمود الرئيس يصنع دوماً تقريباً من خشب السنديان ويتوازن حوله بناء الطاحونة بأكمله وهو مثبت بأربع عوارض مرتبطة بأشجار صلبان ضخمة. كانت دورات الطاحون تنتقل إلى الرحى من خلال ترس الفانوس والتاج. أما المدخل الوحيد فكان بصعود السلم. مقتبسة من الموسوعة *Encyclopédie* ا(ديدرو *Diderot* ودالإمبير *d'Alembert* ا1769-1772).

المربع 8-4

طاقة الرياح وقوتها

تتزايد سرعة الرياح عموماً بنسبة سبع قوة الارتفاع. وهذا يعني مثلاً أنها ستكون أعلى بنسبة 22% تقريباً وهي بارتفاع 20م فوق الأرض من ارتفاع 5 م. إن الطاقة الحركية لواحد م^3 من الهواء (بالجول) تساوي $0.5\rho v^2$ حيث ρ هي كثافة الهواء (نحو 0.12 كغ/ م^3 قرب بالأرض) وv هي متوسط سرعة الرياح (في م/ثا). أما قوة الرياح (بالواط) فهي نتاج طاقة الرياح، وهي منطقة عمودية على اتجاه الرياح التي تمسحها شفرات الآلة (A بالمتر الربع m^2) ومكعب سرعة الرياح: $0.5\rho AV^3$. ومع ازدياد قوة الرياح مع مكعب متوسط السرعة فإن مضاعفة السرعة مرتين تزيد القوة الناتجة ثمانية أضعاف. كانت طواحين الهواء الأولى (الثقيلة نسبياً وسيئة التصميم من حيث المسننات) بحاجة إلى رياح سرعتها 25 كم/ سا على الأقل (7 م/ثا) لكي تتمكن من الشروع بالطحن أو ضخ الماء؛ أما في السرعات الأقل فكانت تدور ببطء وحسب، لكن كان على الأشرعة أن تطوى حين تهب الرياح بسرعة فوق 10 م/ثا (وتفرد عندما تزيد سرعتها على 12 م/ثا) معطية مجالاً ضيقاً فقط (5-7 ساعات يومياً من الدوران اليومي) للعمل المفيد (دني 2007).

من الواضح أن هذه الوقائع كانت تحابي مواقع تهب فيها رياح قوية باستمرار. فيما بعد كانت تصاميم أكفأ ومزودة بمسننات أسلس وجيدة التشحيم تعمل جيداً في رياح تزيد سرعتها على 4 م/ ثا وتعطي 10-12 ساعة من العمل المفيد في اليوم. لم يكن باستطاعة المجتمعات ما قبل الصناعية تسخير جريان الرياح إلا قرب الأرض حيث لم تكن تتجاوز مسافة الأشرعة في معظم الطواحين 10 م. كما أن لجريان الرياح تفاوتاً كبيراً في الزمن والمكان. فحتى في الأماكن التي تهب فيها الرياح القوية نجد أن متوسط سرعة الرياح يرتفع بنسبة 30% وأن تغيير مكان الآلة مسافة 30-50 م قد يقلل أو يزيد متوسط السرعة بنسبة النصف بكل سهولة. لقد أعاقت

الاستطاعة المحدودة لوسائل النقل البري في العصر ما قبل الصناعي إقامة الطواحين في مواقع الرياح الشديدة، وكانت الطواحين ساكنة لا حراك فيها في أغلب الأحيان. وليس باستطاعة أي طاحونة هوائية تسخير كل طاقة الرياح المتوافرة: فهذا يتطلب إيقاف تيار الهواء إيقافاً تاماً! فالحد الأقصى للطاقة المستخرجة يعادل 16/ 27 أو 60% تقريباً من دفق الطاقة الحركية (بتز Betz ا1926). كان الأداء الفعلي 20-30% بالنسبة إلى طواحين ما قبل العصر الصناعي. أما الطاقة النظرية للطاحونة البرجية في القرن الثامن عشر التي تبلغ مسافة شفراتها 20 م فكانت نحو 189 ك واط بسرعة 10 م/ثا لكنها ولدت أقل من 50 ك واط.

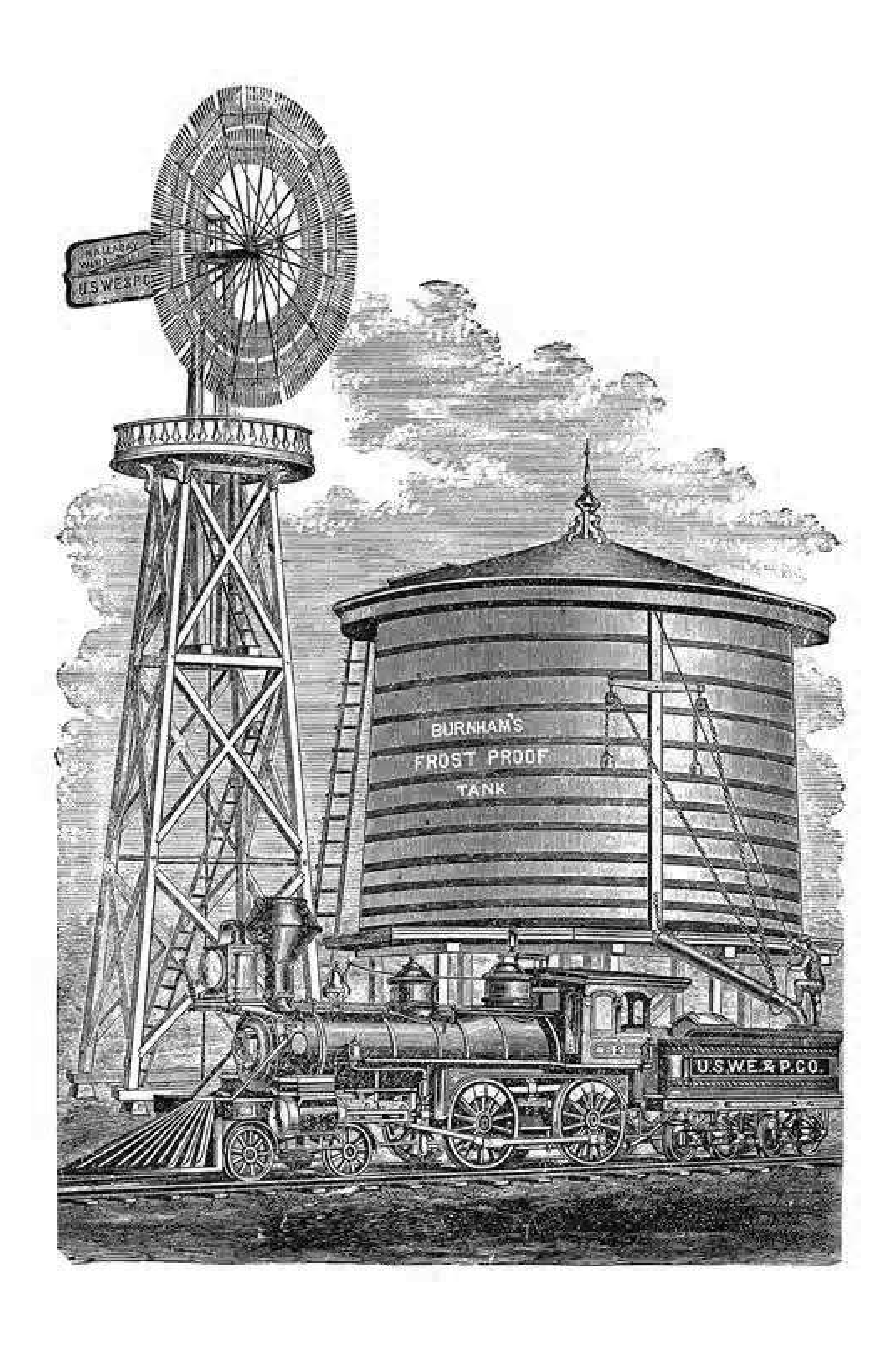
تاريخ أولى طواحين التجفيف إلى مطلع القرن الخامس عشر، مع أنها لم تنتشر على نطاق واسع حتى القرن السادس عشر. كانت طاحونة العمود الأجوف (أو بالهولندية wipmolen) تدير عجلات خشبية مزودة بغرافات، وكان لها عجلة tjasker أصغر تدير لوالب أرخميدس، لكن لم يكن بإمكان أي نوع من الطواحين أن ينتج القدرة المطلوبة لاستصلاح الأراضي الزراعية على نطاق واسع سوى طواحين من طراز سموك. كان في زانسه شانز Zaanse Schans في شمال هولندا 600 طاحونة هوائية أقيمت بعد 1574 لم يبق منها سوى القليل حتى اليوم (زانسه شانز Zaanse Schans ا2015). كانت أعلى طواحين الهواء الهولندية في شيدام Schedam (خمس من الطواحين الثلاثين الأصلية ما زالت قائمة) تطحن الحبوب لإنتاج الينيفر jenever (الجن الهولندي).

أما طواحين الهواء الأمريكية، مثل تلك القائمة على سواحل ماساتشوستس، فكانت تستعمل في استخراج الملح، لكن أعدادها بقيت محدودة. وظهرت طواحين الهواء الأمريكية الجديدة بعد منتصف القرن التاسع عشر مع التوسع غرباً عبر السهول العظيمة، حيث حالت قلة الأنهار وعدم انتظام الأمطار من دون استعمال الطواحين المائية الصغيرة بينما تطلبت قلة الينابيع الطبيعية ضخ الماء من الآبار. فبدلاً من استخراج القدرة بطريقة الطواحين الهولندية الثقيلة (والمكلفة) (أي باستعمال أشرعة قليلة عريضة كبيرة الحجم) كانت طواحين الهواء الأمريكية أصغر حجماً، وأبسط تركيباً، وأقل تكلفة، لكنها كانت آلات عالية الكفاءة تخدم المزارع ومحطات السكك الحديدية المحلية.

كانت تتألف بصفة أساسية من عدد كبير من الشفرات الضيقة أو الأشرعة تثبت إلى عجلات صماء أو مقطعية ومجهزة إما بلوح توجيه جانبي أو يعمل بالقوة النابذة وبدفات توجيه مستقلة. واستخدمت تلك الطواحين المثبتة فوق أبراج مشبكية بارتفاع 6-25 م في ضخ الماء إلى البيوت وسقاية قطعان الأبقار أو في تزويد القاطرات البخارية بالماء (الشكل 4-13) وأصبحت تلك الطواحين الهوائية والأسلاك الشائكة والسكك الحديدية مرتكزات أيقونية ساعدت على فتح السهول العظمى (ويلسون 1999). وتبين تقديرات دورتي (1927) أن استطاعة الطواحين الهوائية الإجمالية زادت من نحو 320 ميغا واط عام 1849 إلى 500 ميغا واط عام 1899، وأنها وصلت ذروتها بطاقة 625 ميغا واط عام 1919.

ولا نملك أي معلومات عن قدرات الطواحين الهوائية الأولى. فالتقديرات التجريبية الأولى التي يمكن الاعتماد عليها تعود إلى أواخر الخمسينيات من القرن الثامن عشر، حين قدر جون سميتون John Smeaton قدرة الطاحونة الهولندية العادية بحصانين (سميتون 1759). وقد دعم هذه الحسابات التي بنيت على أنموذج صغير، بأداء فعلي في عصر بذور الزيت. فبينما كانت الآلات التي تديرها طواحين الهواء تدور سبع دورات بالدقيقة، لم يتمكن حصانان من إتمام 3.5 دورة في الوقت ذاته. كان باستطاعة طاحونة هولندية ضخمة من طواحين القرن الثامن عشر بشفراتها البالغ طولها 30 متراً أن تولد نحو 7.5 ك واط (فوربيز 1958). ومع أن تقديرات حديثة مأخوذة من طاحونة تجفيف هولندية جيدة الصيانة تعود إلى عام 1648 وقادرة على رفع 35 م في رياح سرعتها 8-9 م/ثا أشارت إلى هبوب رياح استطاعتها 30 ك واط، إلا أن الضياع بسبب نقل الحركة قلل تلك الاستطاعة المفيدة إلى ما من دون 12 ك واط.

وتعزز كل هذه النتائج مقارنة رانكين Rankine بين وسائل التحريك الأولية. فقد أعطى طواحين الهواء ذات العمود 1.5-6 ك واط من القدرة المفيدة، والطواحين البرجية 4.5-10 ك واط (رانكين 1866). وتقدر استطاعة طواحين الهواء الأمريكية المفيدة بين 30 واط فقط لطواحين 2.5 م و1.000 واط لطواحين 7.6 م (ولف 1900). وفيما يخص التصاميم الأمريكية في القرن التاسع عشر كانت التصنيفات الأنموذجية (بحسب الاستطاعة المفيدة) 0.1-1 ك واط، 1-2 ك واط بالنسبة إلى طواحين الأعمدة الصغيرة، و2-5 ك واط بالنسبة إلى طواحين الأعمدة الضخمة، و4-8 ك واط بالنسبة إلى طواحين سموك (الثماني) العادية والطواحين البرجية و8-12 ك واط بالنسبة إلى أكبر آلات القرن التاسع عشر. وهذا يعني أن طواحين الهواء القياسية في


U.S.W.E.&P.CO.
BURNHAM'S
FROST PROOF
TANK
U.S.W.E.&P.CO.

الشكل 13-4

طاحونة هاليداي الهوائية. خلال العقد الأخير من القرن التاسع عشر كانت طواحين هاليداي الهوائية النوع الأكثر انتشاراً في أمريكا. كانت منظراً مألوفاً في محطات السكك الحديدية الغربية حيث كانت تضخ الماء للقاطرات البخارية. أعيد نشرها من ولف (1900).

العصور الوسطى كانت بقوة طواحين الماء المعاصرة لها، لكن بحلول بواكير القرن التاسع عشر كانت كثير من طواحين الماء أقوى بخمسة أضعاف من أكبر الطواحين البرجية، ونما هذا الفارق مع تطور العنفات المائية الذي ظهر لاحقاً.

وعلى غرار الطواحين المائية، بلغ إسهام الطواحين الهوائية ذروته بوصفها مولدات للقوة الثابتة خلال القرن التاسع عشر حيث بلغ مجموعها 10.000 في المملكة المتحدة في عام 1800، وفي أواخر القرن التاسع عشر كانت 12.000 طاحونة تعمل في هولندا، و18.000 تعمل في ألمانيا. وفي عام 1900 كانت نحو 30.000 طاحونة (باستطاعة إجمالية تبلغ 100 ميغا واط) قد أقيمت في البلدان المحيطة ببحر الشمال. أما في الولايات المتحدة فقد أقيمت بضعة ملايين وحدة بين 1860 و1900 خلال توسع البلاد غرباً ولم يبدأ عددها بالتناقص إلا في مطلع العشرينيات من القرن العشرين. وفي عام 1889 كان هناك 77 مصنعاً يتقدمها هاليداي، وآدامز وبوكانان (بيكر 2006) وأعداد أكبر من طواحين ضخ الماء أمريكية الطراز تستعمل في القرن العشرين في أستراليا وجنوب أفريقيا والأرجنتين.

وقود الكتلة الحيوية

استطاعت سائر المجتمعات التقليدية تقريباً إنتاج الحرارة والضوء بإحراق الوقود العضوي. فالكتلة النباتية الخشبية، والفحم المستخرج منها، وبقايا الحصاد والروث المجفف وفرت كل الطاقة المطلوبة للتدفئة المنزلية، والطبخ والإنارة والصناعات الحرفية على نطاق ضيق. وفيما بعد استعملت أنواع الوقود هذه في مشروعات صناعية أولية أكبر في شيّ كميات كبيرة نسبياً من الآجر والخزف (السيراميك) وفي صنع الزجاج وصهر المعادن وتشكيلها. لكن الاستثناءات الوحيدة التي تلفت النظر كانت في الصين حيث استُعمل الفحم في الشمال في صنع الحديد وكان الغاز الطبيعي يحرق في سشوان لتبخير الماء المالح وإنتاج الملح (أدشد Adshead ا1997) وفي إنجلترا في العصر الوسيط (نف Nef ا1932).

كان الحصول على الكتلة الحيوية سهلاً لا يتطلب أكثر من التوجه اليومي إلى الغابة القريبة أو سفح الجبل لجمع الأغصان المتساقطة وتكسير اليابس منها أو جمع الأعشاب الجافة أو الهشيم المتبقي بعد الحصاد وتخزينه تحت إفريز السقف في المنزل. وفي أغلب الأحيان كان جمع الوقود العضوي يتطلب من النساء والأطفال السير مسافات طويلة، وقطع الأشجار المضني، وصنع الفحم المرهق، ونقل الوقود مسافات طويلة في عربات تجرها الثيران أو في قوافل الإبل إلى المدن في وسط سهول انتزعت أشجارها، أو في مناطق صحراوية. كان توافر الوقود أو شحه يؤثر في تصميم المنزل وفي اختيار الملابس وعادات الطهو، مثلما كان توفير أنواع الطاقة هذه أحد الأسباب الرئيسة لإزالة الغابات التقليدية.

في بلدان غرب أوروبا اضمحل هذا الاعتماد سريعاً بعد 1850. ويبين أفضل صنوف إعادة تركيب الإمداد بالطاقة الأولية أن الفحم في فرنسا بدأ يشكل في منتصف السبعينيات من القرن التاسع عشر أكثر من نصف وقود الطاقة. أما في الولايات المتحدة فقد فاق النفط والفحم (وقدر صغير من الغاز الطبيعي) محتوى الحطب من الطاقة بحلول عام 1884 (سميل 2010أ). لكن الاعتماد على الوقود النباتي استمر حتى وقت متأخر من القرن العشرين: ففي أكثر البلدان الآسيوية سكاناً ظل الوقود النباتي مسيطراً حتى الستينيات أو السبعينيات، وفي الصحراء الأفريقية بقي أكبر مصادر الطاقة الأولية.

أتاح لنا الاستخدام الحالي دراسة صنوف الإحراق غير الكفء لأنواع الوقود التقليدية ونتائجه وتأثيراته الواسعة على الصحة والملحوظات والتحليلات التي أجريت في العقود الأخيرة (إيرك 1973؛ سميل 1983؛ RWEDP ا2000؛ توماسيلي 2007؛ سميث 2013) ما ساعدنا على فهم التاريخ الطويل لإحراق الوقود النباتي في العصر ما قبل الصناعي. فكثير من هذه النتائج الجديدة تنطبق تمام الانطباق على الظروف ما قبل الصناعية لأن الاحتياجات الأساسية لم تتغير: فبالنسبة إلى معظم الناس في المجتمعات التقليدية تتمثل احتياجات الطاقة في طهو وجبتين أو ثلاث في اليوم، وتدفئة غرفة واحدة على الأقل في الطقس البارد، وفي بعض المناطق إعداد العلف للحيوانات وتجفيف الطعام.

الخشب والفحم

استعمل الخشب بكل أشكاله المتوافرة: كأغصان ساقطة أو متكسرة، أو فروع صغيرة، أو لحاء الأشجار وجذورها - لكن الجذوع المقطوعة لم تتوافر إلا بعد أن شاع استخدام أدوات القطع الجيدة مثل القدوم والفأس والمنشار. أما أنواع الخشب فلم تحدث أي فرق. صحيح أن هناك الآلاف من النباتات الخشبية، وأن اختلافاتها المادية مهمة - فالكثافة النوعية لبعض أنواع البلوط تعادل ضعفي كثافة بعض أنواع الزان - إلا أن تركيبها الكيميائي متماثل إلى حد بعيد (سميل 2013). يتألف خُمسا الخشب من السليلوز وثلثه من هميسليلوز *hemicelluloses* والباقي من اللجنين (الخشبين)، وبلغة العناصر، يمثل الكربون 45-56% والأكسجين 40-42% من مجمل الكتلة. ويرتفع محتوى طاقة الخشب تبعاً لنسبة اللجنين والريزين (وهما على التوالي يحتويان على 26.5

وحتى 35 ميغا جول/كغ مقارنة بـ 17.5 ميغا جول /كغ بالنسبة إلى السليلوز)، لكن الفوارق بين الأنواع الخشبية المألوفة ضئيلة، على الأغلب 17.5 ميغا جول/كغ للخشب الصلب، وبسبب ارتفاع محتوياتها من الريزين 19-21 ميغا جول/كغ، بالنسبة إلى الخشب الطري (المربع 4-9).

وينبغي إرجاع كثافة الطاقة في الخشب إلى المادة الجافة جفافاً كاملاً، لكن نسب رطوبة الخشب الذي تحرقه المجتمعات التقليدية تختلف اختلافاً كبيراً. فالأخشاب الصلبة الناضجة التي تقطع حديثاً (الأشجار المورقة) تحتوي عادة على 30% من الماء، في حين أن نسبة الماء في الأخشاب الطرية (السرو) تتجاوز 40%. فاحتراق مثل هذا الخشب هو احتراق غير كفء لأن جزءاً كبيراً من الحرارة المنطلقة تهدر في تبخير الرطوبة بدلاً من تدفئة الغرفة أو طهو الطعام. فإذا بلغت رطوبة الخشب 67%، لم يعد قابلاً للاشتعال. ولهذا السبب تفضل الأغصان والفروع اليابسة الساقطة أو أجزاء الأشجار الميتة على الخشب الطري، ومن هنا كانت ضرورة تجفيف الخشب في الهواء قبل إحراقه. كان الخشب المقطوع يترك ليجف لبضعة أشهر، لكن حتى في المناخ الجاف يظل الخشب محتفظاً بنسبة 15% من الرطوبة. في المقابل، يحتوي الفحم

المربع 4-9

محتوى الطاقة في الوقود العضوي

الوقود العضوي	محتوى الماء (%)	محتوى الطاقة في المادة الجافة (ألف جول/كغ)
الأخشاب الصلبة	15-50	16- 19
الأخشالب الطرية	15- 50	21- 23
الفحم	ا>1	28- 30
بقايا الحصاد	5- 60	15- 19

الهشيم	7-15	17-18
الروث المجفف	10-20	8-14

المصدر: مبني على سميل (1983) وجنكينز (1993).

على نسبة ضئيلة من الرطوبة وكان الوقود العضوي المفضل على الدوام عند من يستطيعون تحمل تكلفته.

الوقود الجيد يحترق من دون دخان تقريباً، ويبلغ محتواه من الطاقة، الذي يعادل محتوى الفحم البيتوميني الجيد، 50% تقريباً أكثر من محتوى الخشب المجفف بالهواء. أما الميزة الأخرى لفحم الخشب فهو درجة نقائه العالية. فبما أنه كربون نقي عملياً، فهو لا يحتوي على الكبريت أوالفوسفور ما يجعله أفضل نوع من الوقود لا للاستعمال الداخلي وحسب، بل أيضاً في أفران إنتاج الآجر والبلاط والكلس وفي صهر الفلزات المعدنية. ومن المميزات الأخرى للصهر أن المسامية العالية للفحم (مع كثافة نوعية لا تتجاوز 0.13-0.20 غ/سم^3) تسهل صعود غازات التخميد في القمائن *ascent of reducing gases* (سكستون *Sexton* 1897). إلا أن إنتاج هذا الوقود التقليدي الممتاز كان مصحوباً بالكثير من الهدر.

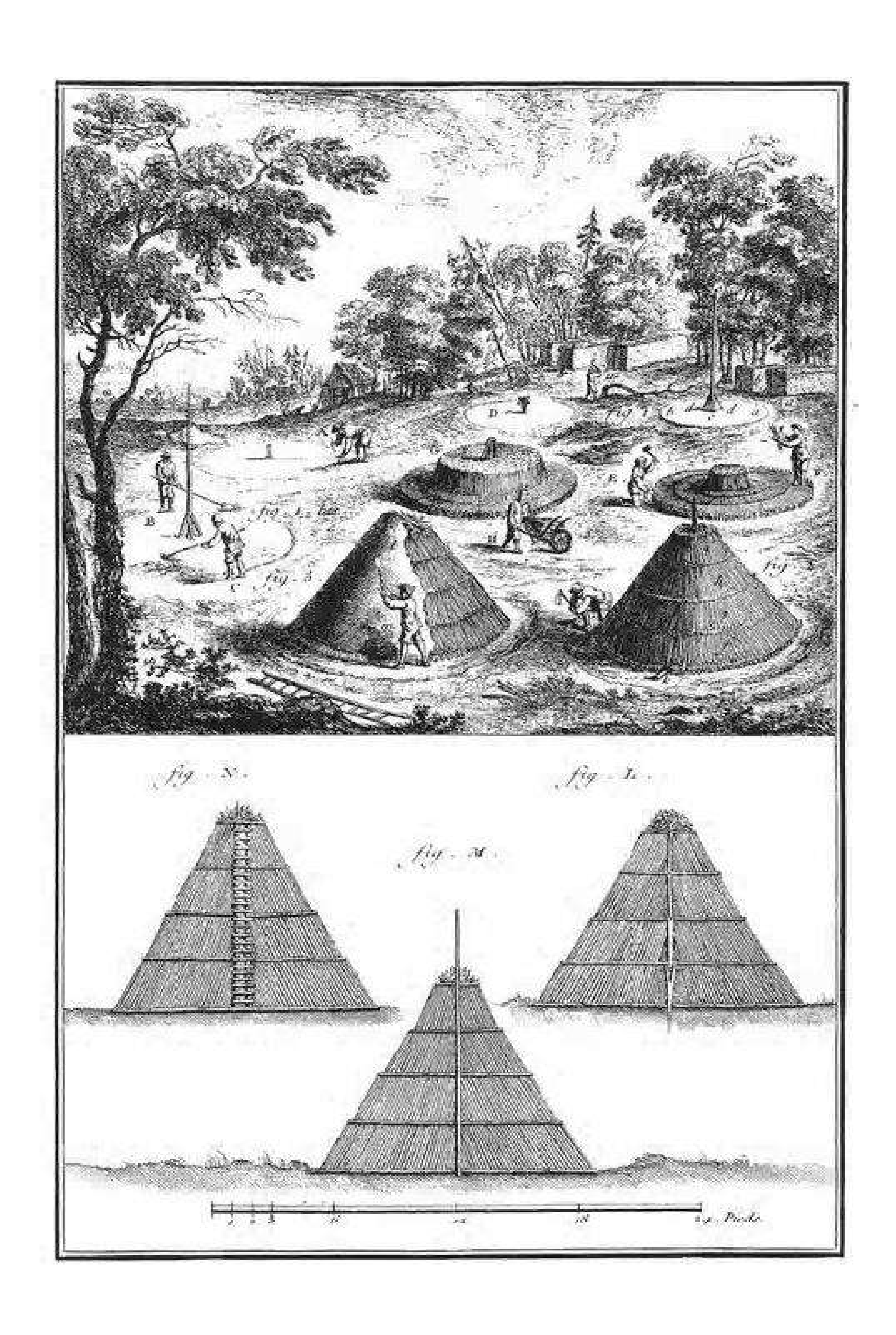
يولد الاحتراق الجزئي لكومة الخشب تحت الأرض أو في القمين الحرارة اللازمة لعملية التفحم. وبالتالي فإنه لا حاجة إلى المزيد من الوقود، لكن يصعب التحكم بكمية المنتجات النهائية ونوعيتها. فالمنتجات الطبيعية لمثل هذه القمائن لم تكن تتجاوز 15% و25% من منتجات الخشب المجفف بالهواء. وهذا يعني أن 60% من الطاقة الأصلية تضيع في أثناء صنع فحم الخشب، وبالتعبير الحجمي، فإن صنع 1 طن من الفحم يحتاج إلى 24 م^3 من الخشب (وليس أقل من 9-10 م^3) (الشكل 4-14). لكن التعويض كان في النوعية: فاحتراقه يولد درجة حرارة تصل إلى 900 درجة مئوية وبالاستعانة بمصدر هواء إضافي، غالباً باستعمال الكير، يمكن أن ترتفع الحرارة إلى 2000 درجة مئوية وهي أعلى ما يلزم لصهر فلزات الحديد (سميل 2013أ).

أدى جمع الخشب بهدف حرقه (واستعماله أيضاً في البناء وصنع السفن) إلى القضاء على الغابات على نطاق واسع بحيث وصل التأثير التراكمي إلى مستويات تدعو إلى القلق في المناطق التي كانت من قبل مغطاة بالغابات. في مطلع القرن الثامن عشر كان 85% من ماساتشوستس مغطى بالغابات، وفي 1870 تراجعت هذه النسبة إلى 30% فقط من الولاية (فوستر Foster وإيبر

Aber ا2004). ليس من الغريب إذن أن يكتب هنري ديفيد ثورو Henry David Thoreau ا(1817-1862) في 6 مارس، 1855 في مذكراته يقول:

غاباتنا انحسرت الآن انحساراً شديداً حتى إن قطع الأشجار هذا الشتاء كان إلى اللب. على الأقل نحن معشر المشائين نشعر بهذا. لم يعد هناك أي بقعة مهمة كانت تغطيها الغابات إلا سمع فيها صوت الفأس هذا الموسم. حتى إنهم شنوا هجوماً مميتاً على البحيرة البيضاء جنوبي بحيرة فير هايفن *Fair Haven Pond* وأزالوا العقدة العلوية فوق الجرف، ومزرعة كولبيرن، وبك ستو، إلخ، إلخ (ثورو 1906، 231).

وتشير الدراسات التي أجريت على المجتمعات التقليدية التي ظلت حتى النصف الثاني من القرن العشرين تعتمد على الوقود العضوي إلى أن المتطلبات من


fig. N.
fig. L.
fig. M.
Pieds

الشكل 4-14

يبدأ إنتاج الفحم بتسوية الأرض وإقامة العمود المركزي. كان الخشب المقطوع يوضع في صفوف حوله ويغطى بالطين قبل الإشعال. مقتبس من الموسوعة *Encyclopédie* (ديدرو *Diderot* ودالإمبير *d'Alembert* ا1769-1772).

الوقود للفرد تقل عن 500 كغ سنوياً في أفقر القرى في المناطق الاستوائية. وكانت خمسة أضعاف كمية الوقود العضوي تستعمل في خطوط العرض حيث الشتاء قاس وحيث ينتج الناس الآجر، والزجاج، والبلاط والمعادن والملح بتبخير الماء المالح. وفي ألمانيا كان صنع 1 كغ من الزجاج يحتاج إلى 2 طن من الخشب (يحرق كله تقريباً للحصول على البوتاسيوم بدلاً من إنتاج الحرارة)، في حين أن تبخير الماء المالح في أوعية حديدية مسخنة بإحراق الخشب كان يستهلك 40 كغ من الخشب لإنتاج 1 كغ من الملح (سيفرل *Sieferle* ا2001).

ولا نملك أي سجلات توثق استهلاك الوقود العضوي في العصور القديمة، ولم تسجل سوى كميات قليلة يعتمد عليها لمجتمعات العصور الوسطى. وفي تقديري أن معدل متطلبات الطاقة السنوية في الإمبراطورية الرومانية في سنة 200 للميلاد وصل إلى 650 كغ للفرد، أي 10 جيغا جول تقريباً أو 1.8 كغ في اليوم (المربع 4-10). وقد أشارت أفضل عملية إعادة بناء للطلب على الحطب في لندن في العصور الوسطى (نحو 1300) إلى أن المتوسط السنوي كان نحو 1.75 طن من الخشب، أو تقريباً 30 جيغا جول للفرد (غالاواي *Galloway* كين *Keene* وميرفي *Murphy* ا1996). وتشير التقديرات إلى أن احتياجات أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية كانت أعلى قبل انتقالها إلى الفحم الحجري.

أما مجتمعات شمال أوروبا، ونيو إنجلاند، والغرب الأوسط أو كندا التي كانت في القرن التاسع عشر تحرق الخشب للتدفئة والطهو، فكانت تستهلك من الخشب سنوياً ما بين 3 و6 أطنان من الوقود للفرد الواحد. كان هذا معدل الاستهلاك المنزلي في ألمانيا في القرن الثامن عشر (سيفيرل 2001). وفي النمسا كان المعدل في عام 1830 قريباً من 5 أطنان/للفرد (كراوسمان *Crausmann* وهيربرت Herbert ا2002) وكذا كان المعدل الأمريكي في سائر أنحاء البلاد في منتصف القرن التاسع عشر (شور Schurr ونيتشيرت Netschert ا1960). ومع أن ذلك الرقم يتضمن الاستخدامات الصناعية المتنامية (وبالأخص الفحم المستعمل في الحدادة) والنقل، إلا أن حرق الفحم للاستعمالات المنزلية بقي على رأس أوجه استهلاك الخشب الأمريكي في خمسينيات القرن التاسع عشر.

المربع 4-10

استهلاك الخشب في الإمبراطورية الرومانية

إن تقديراتي المحافظة تبين سائر صنوف استهلاك الخشب الرئيسة (سميل 2010ج). كان الخبز والحساء الطعام الرئيس لدى الرومان وكانت البستريني *pistrinae* والتابيرني *tabernae* بحاجة إلى 1 كغ من الخشب على الأقل يومياً للفرد الواحد. كان هناك حاجة إلى 500 كغ من الخشب سنوياً لتدفئة المكان وكان ثلث سكان الإمبراطورية تقريباً بحاجة إليه ممن كانوا يعيشون أبعد من البحر المتوسط الدافئ في مناخ معتدل. ويحب إضافة 2 كغ من المعادن وهو معدل استهلاك الفرد السنوي ويحتاج إلى 60 كغ من الخشب لكل كيلو غرام من المعدن. ويصل هذا إلى 650 كغ/للفرد (نحو 10 جيغا جول أو 1.8 كغ/يومياً) لكن كفاءات الاحتراق الرومانية كانت مخفضة انخفاضاً متجانساً (<15%) وكانت الطاقة المفيدة المشتقة من إحراق ذلك الخشب في حدود 1.5 جيغا جول/سنة وهو ما يعادل 50 ل تقريباً أو ملء خزان من البنزين.

وللمقارنة، حين أعد ألن Allen ا(2007) سلتي الاستهلاك المنزلي الروماني افترض أن معدل الاستهلاك هو 1 كغ من الخشب للفرد في اليوم لما أسماه بديلاً محترماً، و0.4 للفرد لميزانية تغطي ما هو ضروري فقط لكن معدلاته استبعدت الوقود المستعمل في أعمال المعادن وصناعة الأدوات. حين قدر مالانيما Malanima ا(2013أ) متوسط استهلاك الخشب للفرد الواحد في أوائل عهد الإمبراطورية الرومانية بحدود 4.6-9.2 جيغل جول/ سنة نصف استعمال الطاقة، مع النصف الآخر انقسم بالتقريب بنسبة 2: 1 بين الطعام وطاقة العلف. كان مجموعه الأعلى 16.8 جيغا جول/ للفرد في حين أن تقديراتي للطعام والعلف والخشب كانت 18-19 والخشب جيغا جول/ للفرد (سميل 2010ج).

بقايا المحاصيل وروث الحيوانات

كانت بقايا المحاصيل وقوداً لا يمكن الاستغناء عنه في المناطق التي أزيلت منها الغابات والسهول الزراعية كثيفة السكان في الأراضي الجافة قليلة الأشجار. ومع أن سوق الحبوب وقشها كانت عادة هي الأوفر، إلا أن كثيراً من بقايا النباتات احتفظت بأهميتها على الصعيدين المحلي والإقليمي. وتشمل هذه سوق النباتات البقولية، والنباتات الدرنية، وسوق القطن وجذوره، وأعواد الجوت، وقصب السكر، والأغصان والفروع الناتجة عن تقليم الأشجار المثمرة. كانت بعض بقايا النباتات بحاجة إلى التجفيف قبل حرقها. فالقش الناضج يحتوي على 7% و15% من الماء، ومحتواه من الطاقة يماثل محتوى الأشجار النفضية (الخشب الصلب).

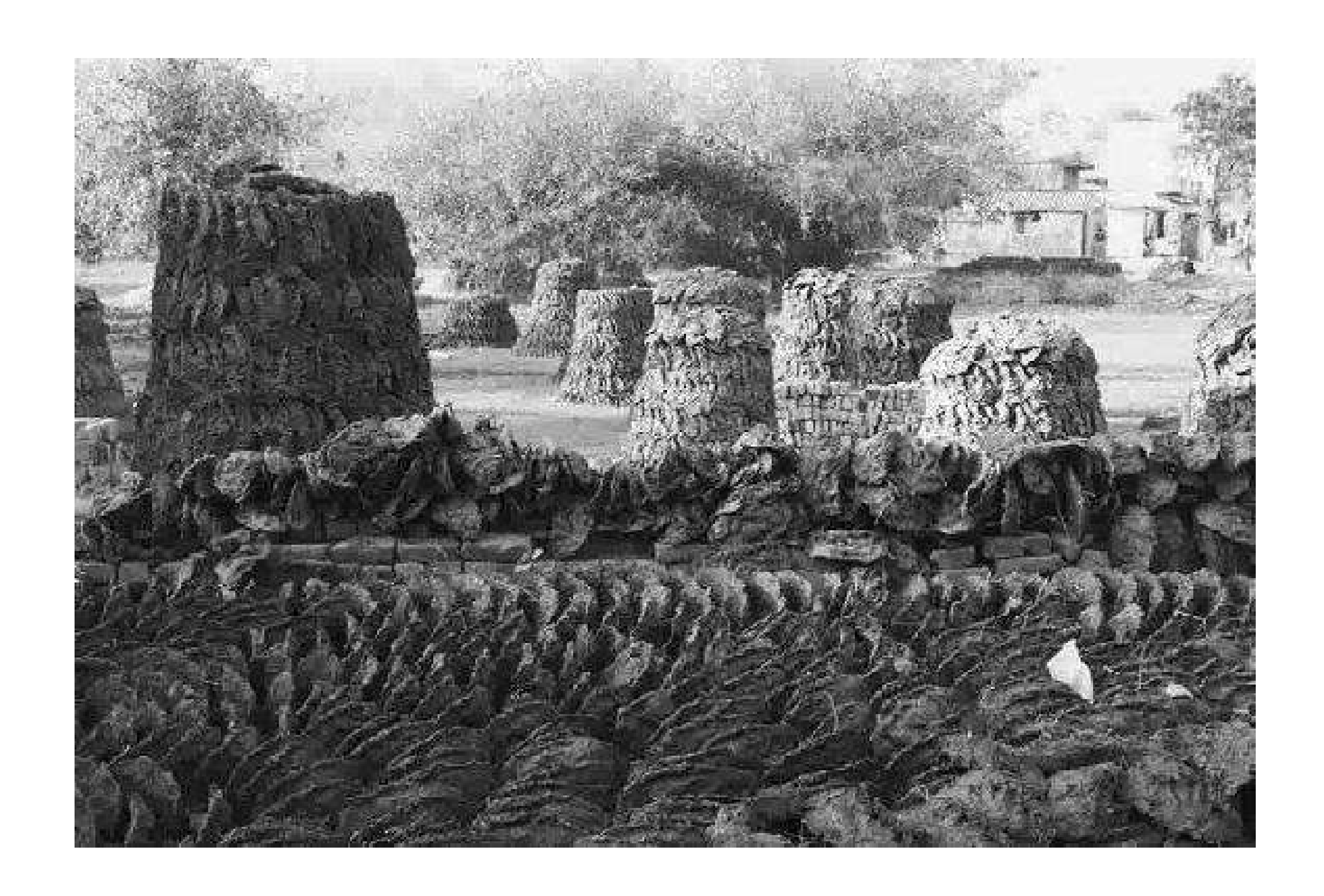
لكن كثافتها أقل بكثير ما يجعل تخزين كمية من القش تكفي للشتاء ليس بسهولة تخزين الأخشاب المقطعة. إن قلة كثافة بقايا النباتات معناها وجوب الاستمرار في تغذية النار المفتوحة والمواقد

البسيطة تقريباً. وكانت بقايا النباتات قليلة في الغالب بسبب عدد من الاستخدامات المنافسة التي لا علاقة لها بالطاقة. وشكلت بقايا البقوليات علفاً ممتازاً وسماداً غنياً بالبروتين، كما اتخذ قش الحبوب غذاءً جيداً للمجترات وفراشاً للحيوانات؛ وقد استخدمته مجتمعات كثيرة (بما فيها إنجلترا واليابان) في عمل أسقف المنازل وكمادة أولية لصنع الأدوات البسيطة والأشياء المنزلية.

ونتيجة لذلك كانت كل قطعة من الوقود العضوي القابل للاحتراق تجمع غالباً للاستعمال المنزلي، والأشواك تحرق، ونوى التمر تستعمل في صنع البيرين (أو دق الفحم) في الشرق الأوسط. أما في سهول شمال الصين فكانت النسوة والأطفال يحملون الأمشاط الزراعية والمناجل والسلال والأكياس يجمعون بها الأغصان الساقطة والأوراق والأعشاب الجافة (كينغ 1927). وفي آسيا الداخلية، وفي شبه القارة الهندية وأجزاء من الشرق الأوسط وأفريقيا والأمريكيتين كان الروث المجفف أهم مصادر الحرارة المستعملة في الطبخ. فقيمة الحرارة المنبعثة من الروث المجفف بالهواء تقارن بتلك المنبعثة من بقايا المحاصيل أو الأعشاب (المربع 4-9).

من الوقائع التي لا تحظى بقدر كاف من الاهتمام إسهام الروث إسهاماً مهماً في التوسع الأمريكي نحو الغرب (ولش Welsch ا1980). فبفضل روث الجواميس البرية والأبقار صار من الممكن عبور القارة واستعمار السهول العظمى خلال القرن التاسع عشر. وكان المسافرون إلى مسالك أوريغون ومورمون يجمعون «خشب الجواميس» كما كان المستوطنون الأوائل يخزنون المؤن الشتوية في أكوام تشبه الإيغلو (أكواخ الإسكيمو الجليدية) أو على شكل صفوف ملاصقة للجدران. كان الوقود الذي يعرف باسم خشب البقر أو بلوط نبراسكا يحترق احتراقاً منتظماً من دون دخان أو رائحة، لكن سرعة احتراقه كانت تحتم الاستمرار بإضافة مزيد منه من دون انقطاع. في أمريكا الجنوبية كان روث اللاما الوقود الرئيس في سهول الأنديز، قلب إمبراطورية الإنكا جنوبي بيرو، وشرقي بوليفيا وشمالي تشيلي والأرجنتين (وينتر هالدر Winterhalder، لارسن Larsen وتوماس Thomas ا1974). كان روث البقر والإبل يستعمل في إقليم الساحل الأفريقي وفي القرى المصرية، حيث يجمع الروث بكميات كبيرة في المناطق الجافة ومناطق الأمطار الموسمية من آسيا، وكان سكان التبت يعتمدون على روث الياك. ولم يكن يستبعد سوى روث الغنم لأنه كان يصدر دخاناً خانقاً عند اشتعاله.

في الهند، حيث الروث لايزال شائعاً في كثير من المناطق الريفية، يقوم الناس، وبالأخص أطفال الهريجان (طبقة المنبوذين) ونساؤهم، بجمع روث البقر والجواميس بانتظام لاستخدامه في منازلهم أو لبيعه (باتواردان Patwardhan ا1973). كان (وما زال) الروث يجمع كشرائح جافة أو كوقود عضوي طري، حيث يمزج الطري منه بالقش أو العصافة (التبن) ويقولب باليد على شكل أقراص ويجفف في الشمس في صفوف، وتطلى به جدران المنازل، أو يجمع في أكوام (الشكل 4-15). وقد وجدت عملية مسح أجريت مؤخراً لاستعمال الطاقة المتولدة من الروث في جنوب آسيا أن 75% من الهنود، و50% من سكان نيبال، و47% من سكان بنغلادش ما زالوا يستعملون الروث وقوداً للطبخ (بيهيرا وآخرون Behera et al. ا2015).



الشكل 15-4

صفوف وأكوام من روث الأبقار متروكة لتجف في فاراناسي Varanasi، أوتار برادش، الهند (Corbis).

الاحتياجات المنزلية

وضع المثل الصيني القديم الأشياء في ترتيبها الصحيح إذ قال إن الناس لا يمكنهم الاستغناء في حياتهم اليومية عما يلي: الحطب، والزيت، والملح، والصلصة، والخل، والشاي. ففي المجتمعات الزراعية التقليدية حيث توافر الحبوب معظم الطاقة الغذائية، كان طبخها ضرورياً لجعل البذور الصلبة صالحة للأكل. لكن قبل طبخ الحبوب (التي تختزن في سلال وجرار وعلب) يجب معالجتها، ولطالما كان طحن الحبوب الخطوة الأولى المتفق عليها عالمياً والمثبتة تاريخياً. أما استخراج الزيت بعصر مختلف أنواع البذور، والفاكهة والمكسرات فأتى في مرحلة لاحقة. وكانت الدرنات تعالج لنزع العوامل غير المغذية أو لخزنها على المدى الطويل، كما كان قصب السكر

يجرش لاستخراج عصيره الحلو. وفي كل هذه الأعمال كانت الطاقة البشرية تعزز تدريجياً وحسب بالطاقة الحيوانية.

ذكرنا آنفا أن الاستخدام الأول للطاقة غير الحية في طحن الحبوب -النواعير الأفقية التي تدير أحجار الرحى- يعود إلى ألفي عام.

فالطبخ كان يحتاج قليلاً من الطاقة الحرارية نسبياً في عملية القلي والتدخين في شرق آسيا. وفي المقابل، كان من الضروري توفير كميات كبيرة من الطاقة لإعداد الخبز، وهو المادة الرئيسة في بقية العالم القديم، والتحميص الذي كان شائعاً في الشرق الأوسط وأوروبا وأفريقيا. في بعض المجتمعات، كانت هناك حاجة إلى الوقود لإعداد علف الحيوانات الأليفة، وفي مقدمتها الخنازير، كما كان التسخين الموسمي ضرورياً في المناطق الواقعة على خطوط العرض المتوسطة ولكن (ما عدا المواقع تحت المنطقة القطبية) كانت المنازل في العصر ما قبل الصناعي تدفأ عادة لفترات قصيرة ولدرجات حرارة منخفضة نسبياً.

في بعض المناطق التي تعاني من شح في الوقود، لم يكن هناك تدفئة شتوية على الإطلاق برغم شهور الشتاء الباردة: كانت التدفئة معدومة في مناطق مينغ وتشينغ الصينية التي أزيلت منها الغابات جنوبي نهر يانغتسي. أما في المناطق الواقعة في أقصى الشمال من جيانغنان (جنوبي نهر يانغتسي في الصين) فيتراوح متوسط درجات الحرارة في يناير وفبراير بين 2 و4 درجات مئوية وتكون الدرجة الدنيا أقل من - 10 درجات. كما أن البرد في المناطق الداخلية من إنجلترا يضرب به المثل حتى بعد إدخال مدافئ الفحم. فمجمل احتياجات الطاقة المنزلية في مجتمعات شرق آسيا والشرق الأوسط كانت ضئيلة جداً. لكن هذا لم يحل من دون ارتفاع الطلب المطلق على الوقود في بعض المجتمعات في شمال أوروبا وأمريكا الشمالية الاستعمارية، بالرغم من أن تدني كفاءة الاحتراق أدت إلى انخفاض حصص الحرارة المفيدة. ونتيجة لذلك، حتى في أمريكا القرن التاسع عشر، فإن المنزل المتوسط الذي كان ينعم بالكثير من الحطب لم ينل سوى جزء يسير من دفق الطاقة المفيدة المتوافرة في منازل القرن العشرين.

إعداد الطعام

في ضوء سيطرة الحبوب على التغذية في سائر الثقافات العالية، كان طحن الحبوب بالتأكيد أهم الاحتياجات في معالجة الطعام في التاريخ. فطعم القمح الكامل ليس مستساغاً، وهضمه صعب، وبالطبع لا يمكن استعماله في صنع الخبز، لكنه إذا ما طحن أنتج دقيقاً بدرجات نعومة مختلفة تجعل استعماله ممكناً في إعداد أغذية يسهل هضمها وعلى رأسها الخبز بأنواعه والمعكرونة. بدأت سلسلة تطور طحن الحبوب بحك الأحجار والمدقات والأجران الحجرية. كان للمطحنة حجر علوي بيضاوي الشكل يدار من وضع القرفصاء، وقد شاع استخدامه في مجتمعات الشرق الأوسط القديمة وفي أوروبا قبل العصر الكلاسيكي.

تعد الطواحين التي تعمل بالدفع ولها أحجار ذات أثلام أولى الاختراعات الرئيسة. وكان لطاحونة الساعة الرملية اليونانية قادوس ورحى مخروطية الشكل. أما إنتاجية العملية التي تعتمد على الجهد العضلي فكانت منخفضة جداً (موريتس 1958) إذ لم يكن العمل الشاق الذي يحك الأحجار معاً أو يدق الحبوب في الجرن لينتج أكثر من 2-3 كغ من الدقيق الخشن في الساعة. ولم يستطع عبدان رومانيان يطحنان الدقيق بالمطحنة اليدوية (المستخدمة منذ القرن الثالث ق.م.) إنتاج أكثر من 7 كغ من الدقيق الخشن في الساعة. أما المطحنة الأكفأ، (التي تعرف باسم المطحنة البومبية وتقتصر على المدن) فكانت مصنوعة من الأحجار البازلتية حيث يكون الجزء السفلي مغطى بالساعة الرملية التي يديرها حمار مكدن يسير في دائرة صغيرة مع أن العبيد كانوا يستخدمون عادة في الأماكن المغلقة لتدوير العجانات في المخابز الكبيرة: كان الشقاء الثمن الرئيس للغذاء في الإمبراطورية الرومانية (المربع 4-11).

كان إنتاج المطحنة التي يدير رحاها حمار (الطاقة المدخلة تعادل 300 واط) يقل عن 10 كغ/ سا إلى 25 كغ/سا (فوربيز 1965(في حين أن حجر طاحون يدار بناعورة صغيرة (1.5 ك واط) ينتج وسطياً 80 - 100 كغ/سا. كان من الممكن استعمال الدقيق في صنع الخبز لتوفير نصف الطاقة الغذائية في المدخول الغذائي (لكن نصيب

المربع 4-11

لوسيوس أبوليوس Lucius Apuleius ا(التحولات *Metamorphoses* IX, 12, 3, 4) عن عبيد المطاحن الرومان

أيتها الآلهة، أي رهط من الرجال رأيت! جلودهم مثخنة بالكامل بآثار السياط، وظهورهم موشحة بل مكسوة بندوب الجراح. بعضهم ليس له ما يستر جسده سوى مئزر، وكلهم بأسمال بالية تكشف عن جلودهم من خلال ملابسهم الممزقة الرثة! جباههم تحمل حروفاً حرقت في الجلد حرقاً. ورؤوسهم نصف حليقة. الحديد يقيد أقدامهم والشحوب يعتريهم إلى حد مخيف. أما عيونهم فكانت محمرة ومتورمة ومسلوخة الجلد من دخان الأفران، وأجسامهم معفرة بالدقيق مثل رياضيين يكسوهم الغبار! (الترجمة الإنجليزية: ج. أ. هانسون J. A. Hanson).

الخبز كان في الغالب يتجاوز 70%). ونتيجة لذلك كانت الطاحونة الواحدة تنتج من الدقيق في نوبة عمل طولها 10 ساعات ما يكفي لإطعام 2.500 - 3.000 شخص، أي سكان مدينة متوسطة الحجم من مدن القرون الوسطى. كان من الممكن تدوير أحجار الطواحين بنواعير أفقية، لكن كل النواعير العمودية وكل طواحين الهواء كانت بحاجة إلى نقل كفء لعزم الدوران بوساطة تروس خشبية. ولم يكن باستطاعة أي طاحونة أن تنتج دقيقاً جيداً من دون شحذ الحجرين العلوي الذي يدور والسفلي الثابت ووضعهما بدقة (فريز 1957). بحلول القرن الثامن عشر، وصل قطر

الأحجار إلى 1-1.5 م، وسمكها إلى 30 سم. أما وزنها فكان 1 طن تقريباً، وتدور 125-150 دورة في الدقيقة. كان القمح يدخل عن طريق القمع إلى الفتحة (العين) في المجرى ويجرش ويطحن بين سطحي الحجرين المستويين.

عند التعامل مع هذه الحجارة الضخمة لابد من مراعاة دقة التوازن. فإذا ما احتك الحجر بالآخر أدى ذلك إلى إصابة المطحنة بأضرار جسيمة وربما إلى إشعال حريق. أما إذا كانا متباعدين أكثر من اللازم كانت الوجبة خشنة بدلاً من أن تكون ناعمة. لم تكن المسافة المسموح بها تزيد على سمك ورقة بنية ثقيلة بين الحجرين عند العين - وسمك منديل ورقي عند الحافة. أما الدقيق المطحون ونواتج الطحن الأخرى فتساق نحو الخارج عبر أخاديد محفورة (أثلام). ويستعمل الحرفيون المهرة أدوات حادة (مناقير الطاحون) لتعميق هذه الأثلام في فترات منتظمة تحددها نوعية الحجر ومعدل الطحن، وعادة ما تكون الفترة كل أسبوعين أو ثلاثة أسابيع. كانت الأحجار البازلتية أو الرملية القاسية، أو قطع الكوارتز الخليوية الملتصقة والمثبتة معاً بوساطة زوايا حديدية الاختيارات المفضلة لأحجار الطواحين، ولا يمكن لأي منها أن يؤدي عمله على الوجه الأكمل من المرة الأولى. فبعد فصل النخالة الخشنة عن الدقيق الناعم يعاد طحن الحبيبات المتوسطة. ويمكن تكرار العملية مرات عدة. وأخيراً ينخل الناتج لفصل النخالة عن الدقيق بحسب درجات نعومته.

كان الطحن على مدى قرون من الزمن بالماء أو بالرياح يحتاج إلى قدر كبير من الجهد الشاق إذ تتطلب العملية إنزال القمح من العربات ورفعه باستعمال البكرات إلى القادوس مثلما تتطلب تبريد الدقيق المطحون حديثاً بتذريته ونخله لفصل أنواعه بحسب درجة خشونته وتعبئته في أكياس. وقد أدخلت المناخل التي تعمل بقوة الماء خلال القرن السادس عشر. لم تصمم المطحنة الآلية إلا في عام 1985 من قبل مهندس أمريكي يدعى أوليفر إيفانز Oliver Evans الذي اقترح استعمال أحزمة نقالة ذات دلاء لرفع القمح ولوالب (لوالب أرخميدس) لنقله أفقياً، ونشر الدقيق المطحون حديثاً ليبرد. لم يلق اختراع إيفانز النجاح على الفور، لكن الكتاب الذي نشره عن الطحن أصبح المرجع الرئيس في هذا الموضوع (إيفانز 1795).

يذكر تاريخ الطبخ عدداً قليلاً من مراحل التقدم حتى بداية العصر الصناعي. كانت المواقد المفتوحة والتقليدية تستعمل للتحميص (في النار أو فوق الأسياخ أو شبكات الشواء) والسلق، والقلي، والطبخ، ومواقد الفحم لغلي الماء وللشواء، كما كانت أفران الطين أو الحجر البسيطة تستعمل للخبز. كانت أرغفة الخبز الفطير توضَع مباشرة على الجوانب الخارجية لأفران الطين (ما زالت هذه الطريقة هي الوحيدة لصنع النان الهندي الصحيح) بينما كانت أرغفة الخبز المختمر توضع على سطوح مستوية. كما شجع شح الوقود على اتباع طرائق تقتصد باستهلاك الطاقة في الطبخ. استعمل الصينيون أوعية طبخ (li) توضع على أثافي مجوفة قبل عام 1500 ق.م. كما أن القدور المائلة قليلة العمق (*الكوالي*) في الهند وجنوب شرق آسيا، والتي تعرف في الغرب باسم الكو Kuo الكانتونية - سرّعت القلي والطبخ والمعالجة بالبخار (ي. ن. أندرسون 1988).

ولا يعرف بالضبط أصل مواقد المطبخ، لكن قبولها على نطاق واسع احتاج إلى بناء المداخن. فحتى في أغنى مناطق أوروبا لم تكن المواقد شائعة قبل بداية القرن الخامس عشر، حيث كان الناس يعتمدون على مواقد قليلة الكفاءة، كثيفة الدخان (إجرتون Edgerton 1961). في العقود

الأولى من القرن العشرين لم يكن لكثير من مواقد الطين أو الآجر الصينية أي مداخن (هومل 1937). ولم تبدأ مواقد الحديد التي تحيط بالنار إحاطة كاملة بالحلول محل المواقد المكشوفة إلا في القرن الثامن عشر. وما يذكر أن موقد بنيامين فرنكلين Benjamin Franklin الشهير الذي صنع عام 1740 لم يكن جهازاً قائماً بذاته، بل كان موقداً داخل مدفأة يستعمل في الطبخ والتدفئة بكفاءة أعلى (كوهين Cohen ا1990). في عام 1798 صمم بنيامين طومسون (الكونت رمفورد Count Rumford ا1753-1814) موقداً من الآجر متعدد الرؤوس له فتحات علوية توضع من خلالها أوعية الطبخ وله فرن أسطواني، وكانت المطابخ الكبيرة أول من استعمل الموقد متعدد الرؤوس (براون 1999).

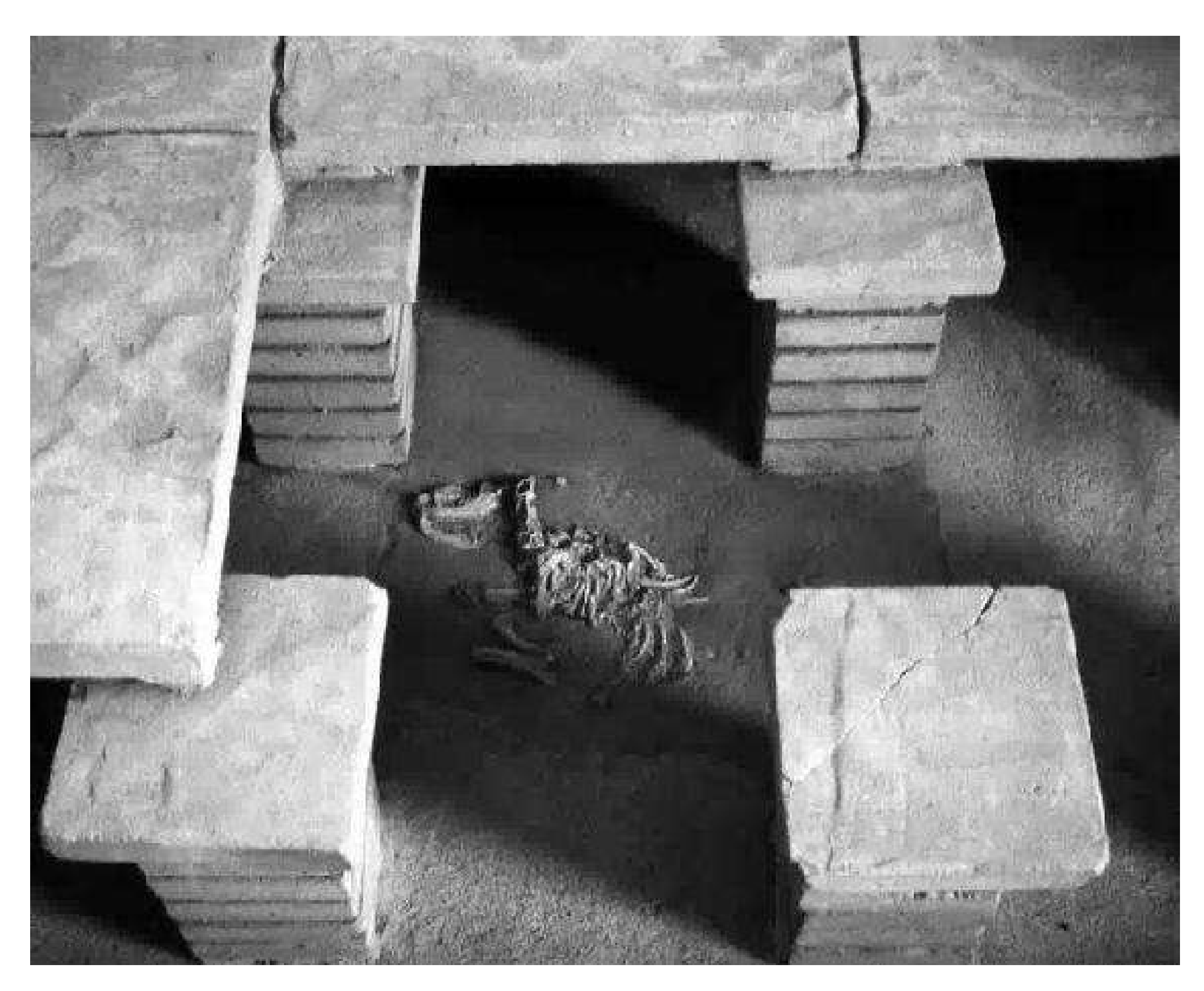
الحرارة والضوء

تتضح الطبيعة البدائية وانعدام الكفاءة الخاص بنظم التدفئة والإضاءة التقليدية عند مقارنتها مع المخترعات الميكانيكية المدهشة للحضارات القديمة. بل ويصير التعارض أكبر في سياق النطاق العريض لأوجه التقدم التقنية في أوروبا ما بعد عصر النهضة. كانت المواقد والمدافئ المفتوحة تقدم حرارة غير كافية عادة خلال السواد الأعظم للحقبة الحديثة المبكرة (1500 - 1800). وقد قدم وهج النار والشعلات المتقطعة الضعيفة لمصابيح الزيت (المدخنة عادة) وللشموع (الغالية كثيراً) إضاءة ضعيفة على مدار آلاف السنوات من التطور قبل الصناعي.

في التدفئة كان الانتقال من المواقد المفتوحة غير المنتظمة قليلة الكفاءة إلى الترتيبات الأكفأ بطيئاً جداً. فمجرد الانتقال من الموقد المفتوح إلى الموقد الثلاثي لم يأت إلا بكسب هامشي في الكفاءة. فالمواقد جيدة التغذية أمكنها الإبقاء على النار مشتعلة من دون مراقبة طوال الليل. لكن كفاءتها في التدفئة كانت سيئة. فأفضل معدلاتها كانت قريبة من 10% لكن الأداء الأقرب إلى الواقع الفعلي كان نحو 5%. وكثيراً ما كان الموقد المشتعل الذي يدفئ ما حوله بالحرارة التي ينشرها ويسحب الهواء الدافئ من الداخل إلى الخارج يتسبب في الواقع في ضياع حرارة الغرفة. فإذا ما أعيق هذا الجريان نتج عن الاحتراق مستويات خطيرة، بل قاتلة، من أول أكسيد الكربون.

تختلف كفاءة مواقد الطبخ المصنوعة من الآجر أو الطين لا من حيث التصميم (الذي كانت تمليه تفضيلات الطبخ) وحسب، بل من حيث الوقود السائد. فمقاييس الطباخات الريفية الآسيوية التي لم يتغير تصميمها طيلة قرون تتيح التحكم بأعلى درجات الكفاءة العملية. إن كفاءة طباخ الآجر الضخم المزود بالمنصب ويحتوي على مداخن طويلة وأغطية محكمة ويعمل بحرق الأخشاب، بلغت نحو 20% على الأكثر. وفي الطباخات الأصغر، التي يلعب فيها الهواء ولها مداخن قصيرة وتعمل بحرق القش والأعشاب كان الأداء المعتاد قريباً من 15% أو 10% وحسب. لكن ما كل ترتيبات التدفئة التقليدية ضعيفة المردود. فهناك ثلاثة نظم تدفئة على الأقل تستعمل الخشب وبقايا الحصاد بطرائق كفؤة لا تخلو من عبقرية وتوافر في الوقت ذاته درجة كبيرة من الراحة.

نعني بهذا الهايبوكوست hypocaust الرومانية والأندول andol الكورية والكانغ kang الصينية. أما التصميمان الأول والثاني فكانا يدفعان بغازات الاحتراق الساخنة عبر أراضي الغرف المرتفعة قبل إطلاقها عبر المداخن. والهايبوكوست اختراع يوناني توجد أقدم بقاياه في اليونان وماغنا غريشيا وهي المناطق الساحلية في جنوب إيطاليا التي استوطنها اليونان ويعود تاريخها إلى القرن الثالث ق.م. (جينوفيه Ginouvès ا1962)؛ وقد استعملها الرومان أولاً في الغرف الساخنة (كالداريا caldaria) في حماماتهم العامة (ثيرمي thermae) ومن ثم لتدفئة المنازل الحجرية في الأقاليم الباردة من الإمبراطورية (الشكل 4-16). وبينت التجارب التي أجريت على الهايبوكوست أن 1 كغ من الفحم بالساعة يستطيع الحفاظ على درجة حرارة 22 ^{o} في غرفة حجمها 5 اxا 4 اxا 3 م حين تكون درجة الحرارة الخارجية صفر ^{o} مئوية (فوربيز 1966). أما تصميم



الشكل 4-16

جزء من نظام التدفئة (الهايبوكوست) الروماني (ويبدو فيه هيكل عظمي لكلب قتلته الأبخرة) معروض في هامبورغ - شوارزناكر في المتحف الروماني في زارلاند. الصورة مقدمة من باربرة ماكمانوس Barbara F. McManus.

التدفئة الثالث فما زال موجوداً في شمال الصين. فالكانغ، وهو مصطبة كبيرة من الآجر (ارتفاعه على الأقل 2 اx ا 2 م و75 سم) يستمد الدفء من الحرارة المنطلقة من طباخ مجاور؛ ويستعمل سريراً في الليل ومكاناً للراحة في النهار (هومل 1937).

أجرى ييتس Yates ا(2012) تحليلاً هندسياً مفصلاً لهذا السرير - الطباخ (أو المبادل الحراري) وقدم اقتراحات لتحسين كفاءته. كانت هذه الترتيبات تنقل الحرارة نقلاً بطيئاً في أنحاء واسعة نسبياً. وفي المقابل لم تكن مدافئ الكانون الرائجة في مجتمعات العالم القديم سوى مصدر محدود من مصادر الدفء، لكنها كانت تنتج نسبة عالية من أول أكسيد الكربون المركز. أما اليابانيون، وهم كبار مستغلي الاختراعات الصينية والكورية، فلم يستطيعوا إدخال الأوندول أو الكانغ في منازلهم الخشبية الهشة، بل اعتمدوا بدلاً عن ذلك على كوانين الفحم (هيباتشي hibachi) وعلى ما يحفظ دفء القدمين (كوتاتسو kotatsu). وقد ظلت حاويات الفحم الصغيرة هذه التي توضع في الأرض وتغطى بقماش محشو قيد الاستعمال حتى وقت متأخر من القرن العشرين. واستمرت حتى يومنا هذا في شكل المدفأة (الكوتاتسو) الكهربائية - وهي مدفأة صغيرة تبنى داخل طاولة منخفضة. حتى تدفئة مجلس العموم البريطاني كانت حتى عام 1791 تتم بكوانين الفحم الضخمة.

كان وقود الكتلة النباتية أيضاً المصدر الرئيس للإنارة التقليدية في سائر المجتمعات ما قبل الصناعية حيث شكل وهج النار، والخشب الراتنجي، والجذوات المشتعلة أبسط الحلول ولو أنها أقلها كفاءة وملاءمة. ظهرت مصابيح الزيت التي تحرق الدهون في أوروبا في العصر الحجري الأعلى، قبل 40.000 عام تقريباً (دو بونيه De Beaune ووايت 1993). ولم تستعمل الشموع في الشرق الأوسط إلا بعد 800 ق.م. كانت مصابيح الزيت والشموع ضعيفة الضوء، قليلة الكفاءة وتنفث الدخان، لكنها كانت على الأقل سهلة النقل ومأمونة الاستعمال وقادرة على حرق مختلف أنواع الدهون والشموع الحيوانية والنباتية، مثل زيت الزيتون، والخروع، وبذور اللفت، وبذور الكتان، وزيت الحوت، وودك (شحم) الأبقار، وشمع العسل، مع فتائل ورق البردي أو الكتاب أو القنب. وحتى نهاية القرن الثامن عشر كان مصدر الضوء الصنعي داخل المنازل هو الشموع المنفردة، ولم تكن الإنارة الساطعة ممكنة إلا من خلال مضاعفة هذه المصادر الضعيفة.

لم تستطع الشموع تحويل سوى 0.01% فقط من طاقتها الكيميائية إلى ضوء. فمتوسط التوهج في لهبها (معدل الطاقة الساقطة على مساحة الوحدة) لا يتجاوز السماء الصاحية بأكثر من 20%. وسهل اختراع أعواد الكبريت في الصين في أواخر القرن السادس إشعال النار وإضاءة المصابيح أكثر من إشعال الصوفان. كانت أعواد الكبريت الأولى أعواداً رفيعة من خشب الصنوبر غمست بالكبريت، ولم تصل إلى أوروبا إلا في مطلع القرن السادس. أما أعواد الكبريت الحديثة الآمنة

التي يدخل الفوسفور في تركيب سطح إشعالها فاستخدمت للمرة الأولى عام 1844 وسرعان ما استحوذت على السوق بأكمله (تايلور 1972). في عام 1794 ابتكر أيميه أرغان Aimé Argand المصابيح التي يمكن التحكم بشدة إنارتها باستعمال ماسك الفتيل مع تزويد مركزي بالهواء والمداخن لسحب الهواء (ماكلوي McCloy 1952).

وما هي إلا فترة وجيزة حتى ظهر غاز الاستصباح المصنوع من الفحم. ففي ظاهر المدن الكبيرة، استمرت عشرات الملايين من المنازل في شتى أنحاء العالم بالاعتماد في إضاءتها وعلى مدى أكثر من نصف القرن التاسع عشر على الوقود العضوي الغريب، وهو الزيت المستخرج من دهون الحيتان. وفي عام 1850 بلغ صيد هذه الثدييات الضخمة المضني والمحفوف بالمخاطر، رغم ضآلة دخله المادي، ذروته (فرنسيس Francis 1990) وقد جسده هيرمان ملفيل Herman Melville في روايته الشهيرة موبي ديك Moby-Dick (1851). ضم أسطول صيد الحيتان الأمريكي، وهو الأضخم من نوعه في العالم، أكثر من 700 مركب في عام 1846. وفي النصف الأول من ذلك العقد كان نحو 160.000 برميل من زيت الحيتان تجلب سنوياً إلى موانئ نيو إنجلاند (ستاربك Starbuck 1978). إلا أن تضاؤل أعداد الحيتان فيما بعد والمنافسة من غاز الفحم والكيروسين أدى إلى التدهور السريع في الصيد.

النقل والبناء

يبين التطور الذي سبق العصر الصناعي في النقل والبناء نمطاً غير متجانس إلى حد بعيد لا من التقدم والركود وحسب، بل حتى من التراجع أيضاً. فقد فاقت السفن الشراعية التي انتشرت في القرن الثامن عشر أفضل سفن العصور القديمة سواء من حيث سرعتها أو قدرتها على الإبحار عكس الريح تقريباً. وبالمثل صار السفر بالعربات ذات المقاعد الوثيرة والمركبة على نوابض جيدة والتي تجرها جياد شدت إلى النير شداً جيداً مريحاً لا يقارن بالركوب على الحصان أو في عربات لا نوابض لها. لكن في الوقت ذاته، وحتى في أغنى البلدان الأوروبية، نرى أن الطرقات لم تكن أفضل حالاً، بل كانت أسوأ بكثير ما كانت عليه في القرون الأخيرة من الإمبراطورية الرومانية. كما أن مهندسي أثينا المهرة الذين صمموا البارثينون، أو بنّائي روما الذين أكملوا البانثيون لم يكونوا أقل شأناً من أحفادهم الذين شيدوا القصور والكنائس في عصر الباروك. كل شيء تغير، وبسرعة، لكن مع نشر وسيلة تحريك أولية أقوى ومواد بناء أفضل. فاختراع المحرك البخاري وتوافر الحديد الصب والفولاذ الرخيص أحدث ثورة في النقل والبناء.

التنقل براً

يمثل المشي والركض، وهما شكلا الحركة الطبيعيان عند البشر، معظم صنوف التحركات الشخصية في سائر المجتمعات في العصر ما قبل الصناعي. كما أن تكلفة الطاقة، ومتوسط السرعة، والمسافات اليومية القصوى تعتمد دوماً بالدرجة الأولى على اللياقة البدنية والتضاريس

(سميل 2008أ). أما الكفاءة في المشي فتزداد كلفتها سواء تحت السرعة القصوى 5-6 كم/سا أو فوقها، كما أن وعورة السطح، والوحول، أو الثلج العميق تزيد تكلفة المشي على المستوى بنحو 25-35%. وبالمثل فإن تكلفة صعود التل تتغير بحسب عامل الانحدار والسرعة. وتبين دراسات مفصلة في هذا المجال تزايداً خطياً تقريبياً في احتياجات الطاقة في طيف واسع من السرعات والمنحدرات (مينيتي وآخرون Minetti et al. ا2002).

يحتاج الجري إلى إنتاج طاقة هي على الأغلب بين 700 و1.400 ميغا واط، وهي تعادل 10-20 مرة معدل الاستقلاب الأساسي. فرجل وزنه 70 كغ يركض ركضاً بطيئاً ينتج 800 واط؛ أما قدرة عداء ماراثوني محترف يركض في سباق (32.195 كم) في 2.5 سا فيحقق معدلاً قدره 1.300 واط (رابوبور Rapoport ا2010)؛ وحين سجل يوسين بولت Usain Bolt الرقم العالمي لمئة متر في 9.58 ثا كانت قدرته القصوى (بعد بضع ثوانٍ من بدء السباق، وحين كانت سرعته نصف سرعته القصوى) 2.619.5 واط، أي 3.5 حصان (غوميز Gómez، ماركينا Marquina، وغوميز Gómez ا2013). إن كلفة طاقة الجري عند الإنسان عالية نسبياً كما أسلفنا (الفصل 2) وللبشر قدرة فريدة على نزع هذه التكلفة من السرعة (كارير Carrier ا1984). وذكر أريلانو Arellano وكرام Kram ا(2014) أن تحمل وزن الجسم والاندفاع نحو الأمام يشكلان نحو 80% من إجمالي كلفة الجري؛ فتحريك الساقين يأخذ 7% والحفاظ على التوازن الجانبي نحو 2% - لكن تحريك الذراعين يخفض الكلفة الشاملة بنسبة 3%.

لقد تحسنت الأرقام القياسية الحديثة باستمرار خلال القرن العشرين (رايدر Ryder، كار Carr، وهيرغت Herget ا1976)، وهي من دون شك أعلى من المنجزات التاريخية بكثير. ولدينا الكثير من الأمثلة البارزة عن سباقات المسافات الطويلة في كثير من المجتمعات التقليدية. فالمسافة التي قطعها فيديبيديس Pheidippides من أثينا إلى اسبارطة في جريه العقيم قُبَيل معركة الماراثون عام 490 ق.م. هي بالطبع الأنموذج الأول للتحمل الجبار في الجري. قطع فيديبيديس مسافة 240 كم في يومين فقط (كان معدل مخرجات قوته، على افتراض أن وزنه كان 70 كغ، نحو 800 واط، أي أكثر من 1 حصان) لكن أهل اسبارطة رفضوا مد يد العون!

لم يسهم تدجين الخيل في إدخال وسائل جديدة أسرع وأقوى في مجال النقل الشخصي وحسب، بل اقترن ذلك بانتشار اللغات الهندية - الأوروبية، والصناعات البرونزية، ووسائل حربية جديدة (أنطوني Anthony ا2007). ركب الناس الخيل مدة طويلة من الزمن قبل وضع النير في رقابها، وقد ذكر أن بداية ركوب الخيل كانت في السهول الآسيوية في منتصف الألفية الثانية ق.م. لكن أنطوني، تيليجين Telegin، وبراون (1991) خلصوا إلى نتيجة تفيد بأن ركوب الخيل ربما بدأ قبل ذلك الزمن بوقت طويل نحو 4000 ق.م. عند شعب سريدني ستوغ Sredni Stog فيما يعرف اليوم بأوكرانيا.

أقام هؤلاء ادعاءهم على دليل غير قاطع حتى الآن يعتمد على الفارق بين الأسنان الضواحك عند الخيل البرية والمدجنة: فالحيوانات التي وضعت الشوكة في أفواهها تبين كسوراً مميزة وتآكلاً في صيغة أسنانها. كذلك استعمل أوترام Outram وفريقه (2009) علامات الضرر الذي تلحقه الشوكة في فم الخيل (بالإضافة إلى دلائل أخرى) لاستنتاج أن أول تدجين للخيل حدث عند أهل

الثقافة البوتية، وأن بعض تلك الحيوانات كان لها رسن وربما امتطيت أيضاً. لم تكن الحيوانات، والشوكة في أفواهها، أسرع عند المشي من الإنسان، لكنها عند الخبب (تجاوز سرعة 12 كم/سا) والجري (حتى 27 كم/سا) كانت تقطع مسافة يصعب على الإنسان قطعها إلا بجهد كبير. لكن الخيل تتمتع عند الجري بميزة ميكانيكية: فعملها العضلي ينخفض إلى النصف من خلال تخزين طاقة الشد المرنة واسترجاعها في عضلاتها وأوتارها التي تشبه النوابض (ويلسون وآخرون 2001).

ولا يصعب على الخيالة من ذوي الخبرة قطع 50-60 كم في اليوم على صهوات جياد سليمة الأبدان، وبتبديل الحصان يستطيعون قطع 100 كم/يوم في الحالات الطارئة. كانت أطول المسافات التي تقطع بانتظام في يوم واحد في الحقبة الوسيطة هي التي قطعها خيالة يام yam المنغوليون (خدمة توصيل الرسائل) (مارشال Marshall ا1993)، وفي العصر الحديث ادعى ويليام ف كودي (1846-1917) أنه قطع 515 كم في 21 ساعة و40 دقيقة لدى عمله في خدمة بوني إكسبريس بعد مقتل الخيال الذي كان من المقرر أن يحل محله (كارتر Carter ا2000). وبيّن مينيتي (2003) أن خدمة المسافات الطويلة كانت ترتب بعناية فائقة إلى أقصى حد. كانت نظم البريد التتابعية تفضل سرعة متوسط قدرها 13-16 كم/سا ومسافة يومية 18-25 كم/حيوان لتقليص خطر إصابة الخيل بالأذى. وقد لحقت بهذه الجماعات ذات الأداء الأمثل كل من الخدمة الفارسية القديمة التي أسسها سايروس بين سوسة وسرديس بعد عام 550 ق.م.، وخيالة يام في القرن الثالث عشر، وخيالة خدمة البوني إكسبرس البرية التي نشطت في كاليفورنيا قبل تأسيس خدمة البرقيات والسكك الحديدية.

لكن ركوب الحصان كان يمثل دائماً تحدياً بدنياً كبيراً. وحيث إن ثلاثة أخماس وزن الحصان موجودة في مقدمته، فإن الطريقة الوحيدة لتطابق المستويات العمودية التي تقطع مركز ثقل الخيال والحيوان تقتضي أن يركب الخيال في القسم الأمامي. لكن جلوس الخيال في الأمام منتصب القامة يجعل مركز ثقله أعلى من مركز ثقل الحصان. ويمكن أن يؤدي هذا إلى حركة رفع سريعة بوساطة ظهر الخيال عند تحرك الحصان إلى الأمام، أو قفزه، أو توقفه الفجائي. وبالتالي فإن الوضعية الأكفأ تتطلب من الخيال أن لا يكون مركز ثقله في الأمام وحسب، بل أن يكون منخفضاً أيضاً. فوضعية القرفصاء التي يتخذها الفارس في السباق هي الأفضل. وما يسترعي الانتباه أن فدريكو كابريلي Federico Caprilli لم يثبت هذا بالدليل القاطع إلا في نهاية القرن التاسع عشر (طومسون 1987).

وجد فاو Pfau وفريقه (2009) أن أوقات سباقات الخيل الرئيسة وسجلاتها تحسنت بنسبة 7% نحو 1900 بعد أن اعتمدت وضعية القرفصاء. فقد عزلت هذه الوضعية الفارس عن حركة مطيته: طبعاً إن الحصان يحمل وزن فارسه، لكنه لم يعد يحرك الفارس في كل خطوة. ولا شك في أن الحفاظ على تلك الوضعية يتطلب جهداً كبيراً كما يتبين من معدل ضربات القلب القريب من الحد الأقصى للفارس في أثناء السباق. تختلف وضعية الانحناء نحو الأمام التي يتخذها الفارس في معظم النسخ المبالغ فيها من مسابقات قفز الحواجز اختلافاً جذرياً عن أساليب الركوب التي نراها في التماثيل والرسومات التاريخية. فكان الفارس، ولأسباب مختلفة، يجلس بعيداً نحو الخلف ويمد

جسمه نحو الأمام للقيام بأكفأ الحركات. وما يذكر أن الفرسان الكلاسيكيين عانوا من مشكلة أكبر ألا وهي افتقار خيلهم إلى الرِّكاب. وما كان لركوب الخيل المدرع، والقتال والمثاقفة أن تنتشر إلا بعد استعمال الركاب على نطاق واسع في أوائل العصر الوسيط في أوروبا.

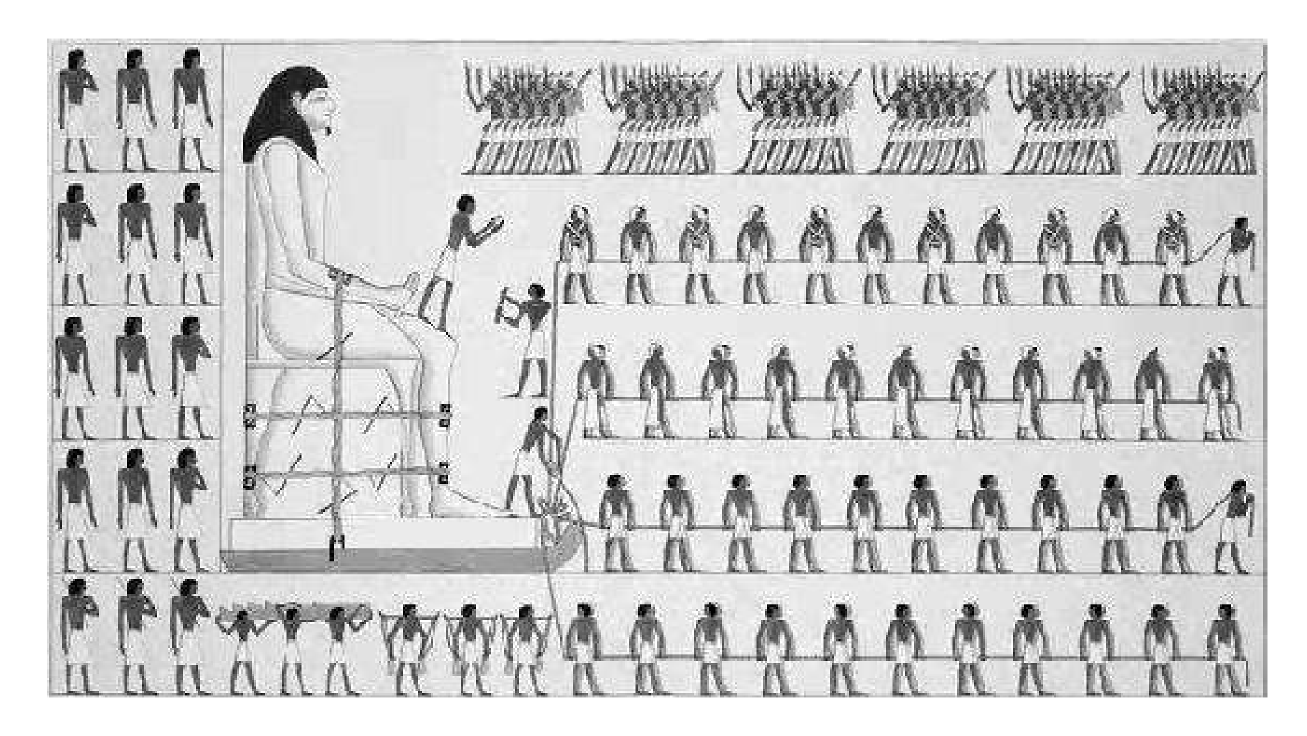
إن أبسط طريقة لنقل الأشياء هي حملها، وحيثما غابت الطرق استطاع الناس التفوق على الحيوانات: فمرونة التحميل، وتنزيل الأحمال، والسير في طرقات ضيقة وصعود التلال غالباً ما كانت تعوض ضعف أدائهم وزيادة. وبالمثل كثيراً ما كانت الحمير والبغال المزودة بالخروج تفضل على الخيل: فهي أكثر ثباتاً ومرونة على الطرق الضيقة لصلابة حوافرها ومقاومتها للعطش. وأكفأ طريقة للحمل هي أن يوضع مركز ثقل الحمل فوق مركز ثقل الحامل - لكن موازنة الحمل ليست عملية دائماً. كانت العصي الموضوعة على الكتف والنير الخشبي الذي يتدلى منه دلوان أو حملان مفضلة على اليدين أو الذراعين. أما أفضل الطرائق لنقل الأحمال إلى مسافات بعيدة في أراضٍ وعرة فهي استعمال حقائب تحمل على الظهر وتثبت بسير جيد يلف على الكتف أو الرأس. ويعرف العتالون في نيبال (الشيربا) الذين يحملون المؤن لحملات تسلق جبال الهيمالايا بأنهم الأفضل. ويستطيع هؤلاء حمل ما بين 30 و35 كغ (قريباً من نصف وزن أجسامهم) إلى معسكر القاعدة، وأقل من 20 كغ حيث المنحدرات شديدة والهواء مخلخل (قليل الأكسجين).

ذكرنا سابقاً أن العتالين الرومان الذين ينقلون القمح المصري في ميناء أوستيا من السفن إلى الصنادل اعتادوا أن يحملوا أكياساً زنة كل منها 28 كغ لمسافات قصيرة. وفي النسخة الخفيفة من المحفات الصينية التقليدية كان رجلان يحملان عميلاً واحداً، وهو حمل يصل إلى 40 كغ لكل حمال. وتعادل هذه الأحمال ثلثي بدن العتال، ولم تكن سرعة المشي عادة تتجاوز 5 كم/سا. وهكذا نرى أن الناس كانوا نسبياً أفضل من الحيوانات من حيث حمل الأشياء. كانت الأحمال في العادة تعادل 30% من وزن الحيوان (أي 50-120 كغ على الأرجح) في الأماكن المنبسطة و25% عند تسلق التلال. وبالاستعانة بالعجلات استطاع الرجال نقل أحمال تتجاوز وزن أجسامهم بكثير. وتشير الأحمال المسجلة إلى أن أكثر من 150 كغ كانت تحمل في عربة صينية ذات عجلتين حيث كان الحمل يوضع فوق محور العجلتين تماماً. أما العربات الأوروبية بعجلتها الأمامية الغريبة فلم تحمل أكثر من 60-100 كغ.

وبمعونة أجهزة ميكانيكية بسيطة كان بمقدور التطبيقات المجتمعة للجهد البشري إنجاز بعض المهمات الصعبة على نحو يستحق الإعجاب. ولا شك في أن أصعب أعمال النقل في المجتمعات التقليدية كانت نقل أحجار البناء الضخمة أو الأجزاء الجاهزة إلى مواقع البناء. ففي كل الثقافات القديمة العالية كانت الأحجار الضخمة تؤخذ من المقالع وتوضع في مكانها (هايزر Heizer ا1966). ولدينا عدد من الصور القديمة توضح كيفية إنجاز هذا العمل. ومن المؤكد أن أجمل صورة موجودة كما ذكرنا من قبل هي لوحة مصرية من مقبرة جحوتي حتب في البرشة يعود تاريخها إلى 1880 ق.م. (أوزيريسنت 2015). يوضح المشهد 166 رجلاً يسحبون قطعة حجر ضخمة على مزلجة فوق منحدر يصب عليه رجل سائلاً شحمياً من وعاء (الشكل 4-17). ومع أن التشحيم يخفض عامل الاحتكاك إلى النصف، إلا أنهم بعملهم الجماعي الذي جاوز 30 ك واط،

استطاعوا تحريك حجر زنته 50 طناً. ومع ذلك، تمكنت بعض المجتمعات ما قبل الصناعية من التفوق على مثل هذا الجهد الهائل.

استعمل عمال البناء من الإنكا أحجاراً غير منتظمة الأشكال، كثيرة الأضلاع تتطابق حوافها بإحكام مدهش. فسحب حجر زنته 140 طناً، وهو أثقل قطعة في في جنوب بيرو، فوق مزلجة (جسر) كان يتطلب تنسيق قوى 2.400 رجل تقريباً (بروتزن Protzen ا1993). ومن المؤكد أن ذروة القوة القصيرة لهذه المجموعة كانت نحو 600 ك واط لكننا لا نعرف شيئاً عن الشؤون اللوجستية لمثل هذا المشروع. فكيف سُخِّر 2.000 رجل لسحب الحجر سحباً متناسقاً؟ كيف كانوا يصطفون في حدود مزلجة الإنكا الضيقة (6-8 م)؟ وكيف تعامل الناس في بريتاني القديمة مع أضخم نصب حجري (وزنه 340 طناً) أقامه مجتمع أوروبي (نيل Neil ا1961)[23].



الشكل 4-17

نقل تمثال ضخم من الرخام لجحوتي حتب، حاكم إقليم Hare Nome (ارتفاعه 6.75 م وزنته أكثر من 50 طناً) (أوزيريسنت 2015). وتعيد اللوحة صورة جدارية أصابها التلف في مقبرة جحوتي حتب في البرشة في مصر (Corbis).

ولا يظهر تفوق الحصان إلا عند اجتماع الحدوات والطقم الكفء. فالأداء في النقل البري اعتمد على النجاح في تقليص الاحتكاك والسماح بسرعة أكبر. لذلك كانت حالة الطريق وتصميم العربات

من العوامل الحاسمة، والفوارق في الطاقة اللازمة بين نقل حمل فوق طريق ناعم صلب وطريق خشن مكسو بالحصى كبيرة. ففي الحالة الأولى نرى أن القوة اللازمة لا تتعدى 30 كغ لتحريك حمل وزنه 1 طن، أما في الحالة الثانية فنحتاج إلى خمسة أضعاف قوة الجر، وعلى الطرقات الموحلة أو المكسوة بالرمال قد تكون القوة اللازمة أكثر من الأولى بسبع أو عشر مرات. كانت المواد الشحمية (الودك أو الشحم الحيواني والزيوت النباتية) تستعمل على الأقل منذ الألف الثانية ق.م. وفي القرن الأول ق.م. كان للبيليا البرونزية السلتية أخاديد داخلية فيها كرات خشبية أسطوانية (دوسون Dowson ا1973). وقد تكون البيليا الصينية أقدم لكن البيليا لم توثق للمرة الأولى إلا في أوروبا في مطلع القرن السابع عشر.

لم تكن معظم الطرقات في المجتمعات القديمة سوى مسارات ممهدة تتحول إلى حفر موحلة أو طرقات ترابية تكسوها الأتربة. أما الرومان، وبدءاً بطريق أبيا (بين روما وكابوا) عام 312 ق.م. فاستثمروا جهوداً جبارة وقدراً كبيراً من التنظيم في مد طرقات تكسوها طبقة علوية صلبة (سيتويل Sitwell ا1981). كانت الطرقات الرومانية المتينة تغطى بالخرسانة وأحجار الرصف أو قطع الأحجار المثبتة بالإسمنت. وفي عهد ديوكليت (285-305) كان نظام الطرق الرومانية الرئيسة[24] قد قارب 85.000 كم. أما كلفة الطاقة الشاملة لهذا المشروع فكانت على الأقل بليون يوم عمل. هذا المجموع الهائل يتوزع على مستلزمات يسهل التعامل معها على مدى قرون من البناء المستمر (المربع 4-12). لم يستطع أحد أن يتفوق على المنجزات الرومانية في بناء الطرق في أوروبا الغربية إلا في القرن التاسع عشر. أما في المناطق الشرقية من القارة فكان ذلك في القرن العشرين.

لم يكن في العالم الإسلامي شبكة طرق مثل الشبكة الرومانية العامة، بالرغم من وجود مواصلات واسعة (هيل 1984). فقد كانت خطوط القوافل المطروقة، والتي لم تكن فعلياً سوى طرقات ترابية، تصل ما بين أجزاء البلاد مترامية الأطراف. ويعود الفضل في هذا إلى الإبل التي حلت محل النقل بالعربات في المنطقة الجافة بين المغرب وأفغانستان. أما التطور الذي سبق الفتح الإسلامي فيعود إلى الضرورات الاقتصادية بالدرجة الأولى (بولييه Bulliet ا1975). وبالمقارنة نرى أن الإبل لم تكن أقوى وأسرع من الثيران وحسب، بل كانت أكثر منها تحملاً وأطول عمراً أيضاً. وتستطيع الجمال السير فوق أراضٍ وعرة وأن تأكل علفاً قاسياً وتتحمل الجوع والعطش. وقد تعززت هذه الميزات بإدخال السرج العربي الشمالي بين 500 و100 ق.م. وقد وفر السرج ركوباً وترتيبات نقل ممتازة وأتاح فرصة إحلال القوافل محل العربات في المناطق الجافة من العالم القديم قبل التوسع العربي.

أما الإنكا، فبنوا شبكة طرق تستحق الإعجاب بفضل عمال السخرة في أثناء

المربع 4-12

تكلفة الطاقة الخاصة بالطرقات الرومانية

لو افترضنا أن الطريق الروماني العادي كان بعرض 5م، وبعمق 1 م، فإن بناء طريق طوله 85.000 كم يتطلب رصف نحو 425 ألف م^3 من الرمل والحصى والخرسانة والحجر بعد ترحيل على الأقل 800 ألف م^3 من التراب والصخر لإعداد قاعدة الطريق والأطراف والخنادق. وعلى افتراض أن باستطاعة العامل الواحد التعامل مع 1 م^3 من مواد البناء في اليوم فإن أعمال قطع الأحجار من المقالع، وسحقها، ونقل الأحجار وحفر الرمل للأساسات، والخنادق ومد الطبقات السفلية من الطرق، وإعداد الخرسانة والملاط، ورصف الطريق يحتاج إلى ما مجموعه 1.2 مليون يوم عمل. وحتى لو أن احتياجات الصيانة والإصلاح ضاعفت هذه المتطلبات ثلاثة أضعاف في نهاية المطاف، فإن توزيع هذا الرقم الإجمالي على مدى 600 عام من البناء يعطي معدلاً سنوياً قدره ستة ملايين يوم عمل أي ما يعادل 20.000 عامل بناء يعملون بدوام كامل. ويمثل هذا (بمعدل 2 ميغا جول/يوم) استثمار طاقة سنوياً يقد بنحو 12 تريليون جول عمل.

إرسائهم أسس إمبراطوريتهم بين القرنين الثالث عشر والخامس عشر. وبلغ طول الشبكة 40.000 كم من الطرق المصلحة لكل الفصول والتي تمر فوق عبارات وجسور ومزودة بعلامات تدل على المسافات. أحد الطريقين الرئيسين الملكيين، وهو الذي يتعرج عبر جبال الأنديز، كان مرصوفاً بطبقة من الأحجار. أما عرضه فيتراوح بين 6 م على ضفاف الأنهار و1.5 م عند الممرات الصخرية الصلبة (كندال Kendall ا1973)، كما كان عرض الوصلة الساحلية غير المرصوفة 5 م. ولم يكن أي من الطريقين ملائماً للعربات، فقط لقوافل الناس واللاما التي يحمل كل منها 30-50 كغ لمسافة لا تتجاوز 20 كم في اليوم.

وفي عهد أسرتي تشين وهان، بنى الصينيون نظام طرق واسعاً بلغ 40.000 كم (نيدام وآخرون 1971). لكن شبكة الطرق الرومانية (الكيرسوس) كانت أكثف، سواء من حيث الطول الإجمالي وكثافة الطريق في كل منطقة أو متانة البناء. وفيما يلي وصف ستاتيوس Statius (موزلي Mozley ا1928، 220) لبناء طريق دوميتيانا Via Domitiana عام 90 م:

يبدأ العمل بحفر الأثلام ووضع علامات حدود الطريق وإفراغ الأرض بالحفر العميق، بعدها يُملأ الخندق المحفور بمواد أخرى لإرساء الأساس لمرتفع الطريق المقوس منعاً لانهيار التربة فالقاعدة الضعيفة لا توافر مستقراً ثابتاً للحجارة التي تتحمل أوزاناً كبيرة. بعدها توضع الأحجار على طرفي الطريق مع العديد من الأسافين. ويا لعدد الرجال الذين يعملون معاً! بعضهم يقطعون الشجر ويعرون سفوح الجبال، وبعضهم يعملون على تسوية العوارض الخشبية والصخور بالحديد، وآخرون يرصون الأحجار جنباً إلى جنب ويحبكون العمل بالرمل المشوي والطوفة (أحجار كلسية تترسب حول الينابيع)، وآخرون يعملون على تجفيف البرك الظامئة وتحويل مجاري السواقي الأصغر بعيداً عن الطريق.

أما الطرق الصينية فكانت تبنى بخلط الأنقاض والحصى ودقها بمدق من حديد. ويوفر هذا سطحاً أكثر مرونة لكنه أضعف من الطرق الرومانية الأفضل. صحيح أن خدمة المراسلات استمرت بعد انحدار أسرة هان، إلا أن نقل البضائع والناس اضمحل بصفة عامة. ولم يعوض عن هذا الانحدار وزيادة إلا في بعض أجزاء البلاد من خلال تطوير النقل عبر القنوات المائية. كانت معظم البضائع تُحمل في عربات تجرها الثيران أو على عربات ذات عجلات، والناس يتنقلون في عربات ذات عجلتين أو محفات حتى وقت متأخر من القرن العشرين. وتعود أول وثيقة عن العربات من مدينة الوركاء Uruk إلى نحو 3200 ق.م. كان لها عجلات صماء ثقيلة قطرها يصل إلى 1 م مصنوعة من ألواح ذات أوتاد ونقور خشبية. وسرعان ما راجت هذه العربات بين مختلف الثقافات الأوروبية (بيغوت Piggott ا1983). كانت بعض العجلات في أوائل عهدها تدور حول محور ثابت؛ وأخرى تدور بدورانه. وكانت التطورات اللاحقة تتجه نحو العجلات ذات الأصابع، والأخف وزناً. والتي تدور دوراناً حراً (في مطلع الألفية الثانية ق.م.) واستخدام محور أمامي يدور حول مركزه في العربات رباعية العجلات ما يسهل الالتفاف حول المنعطفات الحادة.

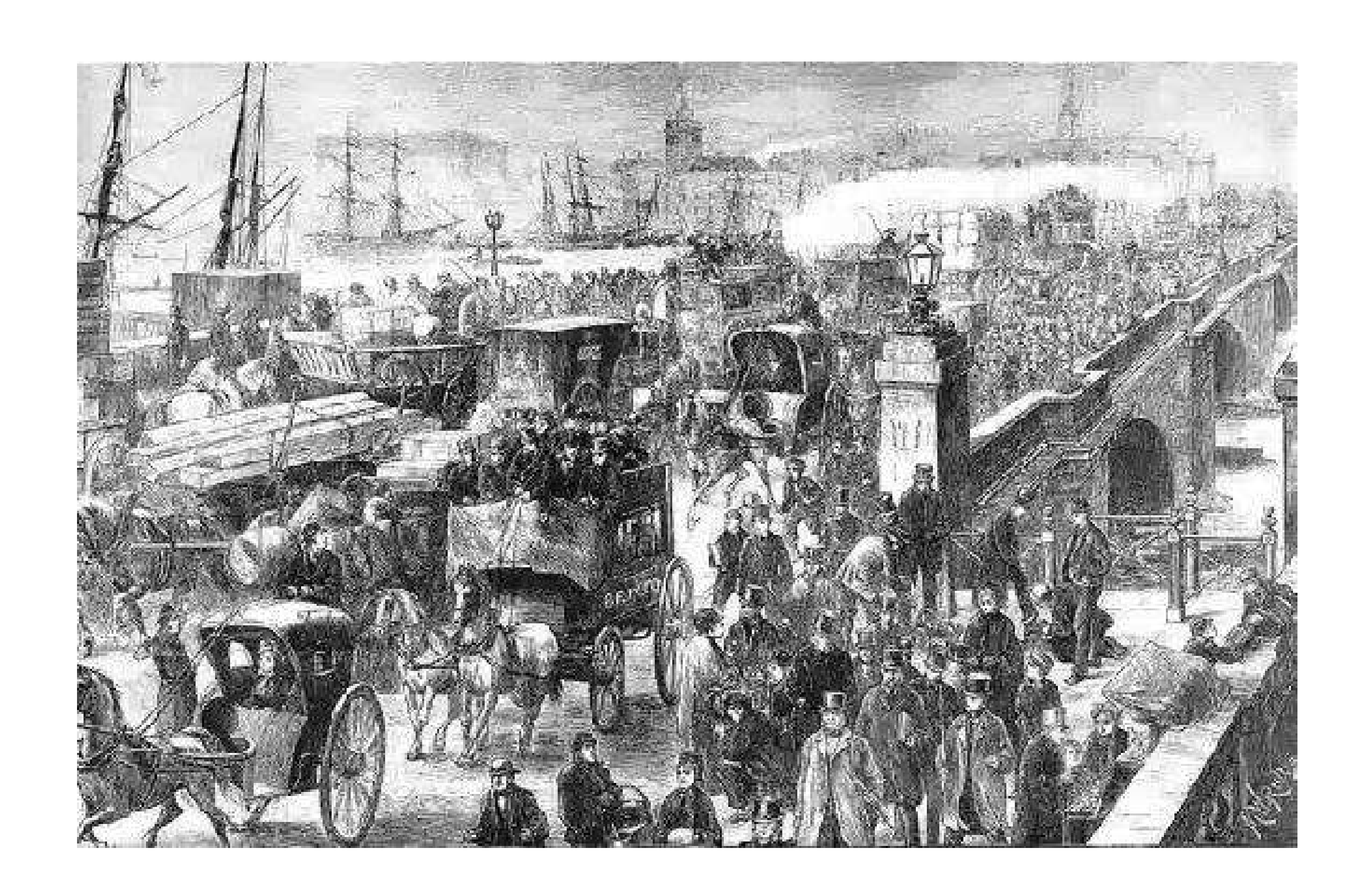
إذا كان تكدين الخيل وشدها إلى النير سيئاً، وكانت تسير على طرقات سيئة، فإنها تتحرك ببطء ولو كانت أحمالها خفيفة نسبياً. فمواصفات الحدود القصوى حددت الأحمال على الطرق الرومانية في القرن الرابع بـ 326 كغ بالنسبة إلى العربات التي تجرها الخيل، وبما لا يتجاوز 490 كغ بالنسبة إلى العربات البطيئة التي تجرها الثيران (هايلاند Hyland ا1990). لقد حددت السرعات البطيئة لوسيلة النقل هذه مداها اليومي بين 50 - 70 كم بالنسبة إلى عربات المسافرين التي تجرها الخيل على طرقات جيدة، و30-40 بالنسبة إلى العربات الأثقل التي تجرها الخيل، وبما لا يتجاوز نصف هذه المسافات بالنسبة إلى الثيران. أما الرجال الذين يدفعون عربات ذات عجلات فيقطعون 10-15 كم في اليوم. بالطبع كان المراسلون على صهوات جيادهم السريعة يقطعون مسافات أطول بكثير، وقد وصلت أطول المسافات المسجلة على الطرقات الرومانية إلى 380 كم/ يوم. أما السرعات البطيئة والاستطاعات المنخفضة للنقل البري فقد انعكست ارتفاعاً على التكاليف كما يتبين من الأرقام التي أوردها ديوكليشان Diocletian في مرسوم تحديد الأسعار[25]. في عام 301 كان نقل القمح مسافة 120 كم يكلف أكثر من نقله بحراً من مصر إلى أوستيا - ميناء روما. وبعد وصول القمح إلى أوستيا، على مسافة 20 كم من روما، كان يعاد تحميله في الصنادل لينقل في نهر التيبر بدلاً من شحنه في عربات تجرها الثيران.

وقد سادت ظروف مشتبهة في معظم المجتمعات حتى وقت متأخر من القرن الثامن عشر. ففي بداية القرن كان استيراد كثير من البضائع إلى إنجلترا بحراً من أوروبا أرخص من حملها على الحيوانات من المناطق الداخلية في البلاد. وقد وصف الرحالة حالة الطرق الإنجليزية بأنها مخيفة، مزرية، كريهة وجهنمية (سافيج Savage ا1959). تسببت الأمطار والثلوج في إعاقة السير على الطرقات المفروشة بالتراب والحصى الصغيرة، وفي كثير من الحالات كان ضيق الطرقات لا يسمح إلا بمرور ما يحمل على الظهر. كذلك كانت حالة الطرقات في أوروبا وعربات المسافرين التي تجرها أربعة أو ستة من الخيل التي كانت تنفق في أقل من ثلاث سنوات. ولم تظهر علائم التحسن إلا بعد عام 1750 (فيل Ville ا1990). في البداية شمل التحسن تعريض الطرقات وتزويدها بأنظمة الصرف، ثم تلا ذلك إكساؤها بطبقة خارجية عالية المقاومة (مثل

الحصى الدقيقة والأسفلت والخرسانة). وأخيراً استطاعت الخيل الأوروبية الثقيلة أن تبدي أداءها العظيم في النقل. ففي منتصف القرن التاسع عشر سمح بزيادة الحد الأقصى للحمل في فرنسا إلى 1.4 طن أي بنحو أربعة أضعاف الحد الروماني.

أما في النقل المدني فلم تبلغ الخيل ذروة أهميتها إلا في عصر السكك الحديدية بين عشرينيات القرن التاسع عشر ونهايته (دينت Dent ا1974). فبينما كانت القطارات تستولي على شحنات ورحلات المسافات الطويلة، سيطرت عربات الخيل على نقل البضائع والركاب في المدن الأوروبية والأمريكية الشمالية التي كانت تشهد نمواً سريعاً. فقد أسهمت القاطرات البخارية في استعمال الخيل (غرين 2008). فمعظم الشحنات التي تنقل بالقطارات كانت تفرغ وتوزع تبعاً لأنواع العربات التي تجرها الخيل. كما كانت هذه العربات تنقل المواد الغذائية والمواد الأولية من الريف القريب. أضف إلى ذلك أن حياة الرفاهية في المدينة أنتجت كثيراً من العربات الخاصة، وعربات الأجرة، والعربات التي تجرها الخيل (بدأ في لندن عام 1829) وعربات التوزيع (الشكل 4-18).

شكل توفير الإصطبلات للحيوانات في الحظائر وتأمين القش والتبن عبئاً ثقيلاً على مساحة المدن (ماشاين McShane وتار Tarr ا2007). وبنهاية عهد الملكة فيكتوريا، كان في لندن نحو 300.000 حصان. فكر مخططو مدينة نيويورك في تخصيص حزام خارج المدينة يتسع لعدد كبير من الخيل تسرح فيها بين ساعات ذروة الازدحام. من أكبر العناصر في توازن الطاقة في مدن أواخر القرن التاسع عشر تكاليف الطاقة



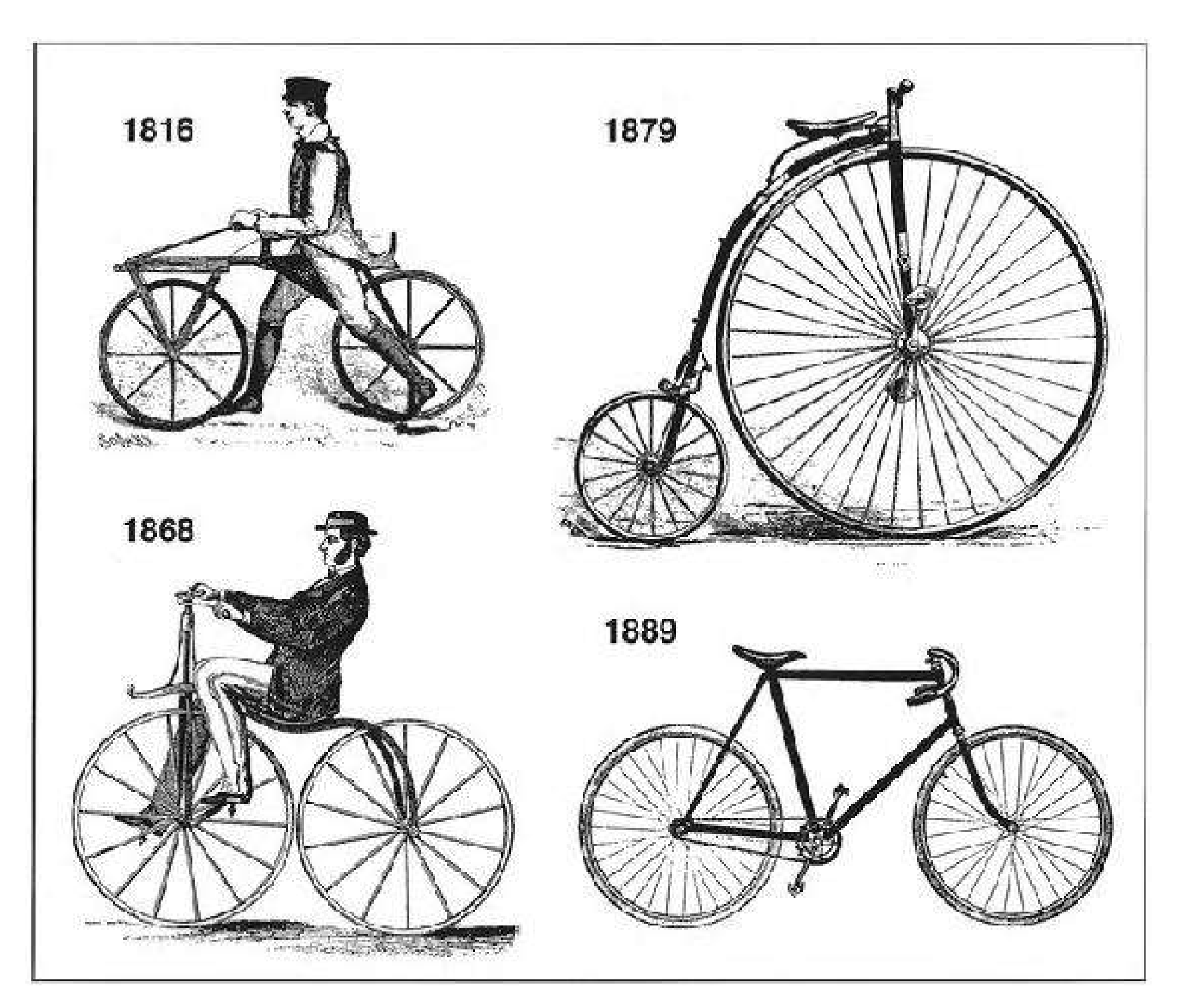
الشكل 4-18

لوحة بأسلوب الحفر من صحيفة أخبار لندن المصورة *Illustrated London News* الصادرة في 16 نوفمبر 1872 تبين الكثافة العالية لحركة عربات الخيل (والحافلات التي تجرها الخيل، والعربات الثقيلة) في مدن أوروبا التي كانت تتجه بسرعة نحو التصنيع في أواخر القرن التاسع عشر.

المباشرة وغير المباشرة الخاصة بالنقل داخل المدن الذي يعتمد على عربات الخيل - مثل زراعة القمح والقش، وتقديم العلف والإصطبلات للحيوانات، وتنظيفها، وحدوها، وتكدينها، وقيادتها، والتخلص من فضلاتها إلى البساتين المحيطة بالمدينة. لكن سيطرة الخيل هذه انتهت نهاية مفاجئة. فالكهرباء ومحركات الاحتراق الداخلي كانت تكتسب صفة العملية في الوقت الذي كانت فيه أعداد خيل المدن تحقق أرقاماً قياسية إبان التسعينيات من القرن التاسع عشر. وفي أقل من جيل، حلت محلها الحافلات (الترام) الكهربائية، والسيارات والباصات.

ومن المثير للاهتمام أنه في ذلك الوقت وحسب توصل الميكانيكيون الأوروبيون والأمريكيون إلى نسخة عملية من أكفأ مركبات الحركة التي تدار بالطاقة البشرية: الدرَّاجة الحديثة. فعلى مدار

قرون كانت الدراجات مخترعات خرقاء، بل وخطيرة، ولم يكن ثمة فرصة لتبنيها من جانب الجماهير كمركبة ملائمة للنقل الشخصي. ولم تتحقق التطورات السريعة إلا خلال ثمانينيات القرن التاسع عشر؛ إذ ابتكر جون كيمب ستارلي وويليام سوتون الدراجات ذات العجلتين المتساويتين في الحجم والتوجيد المباشر والإطار ماسي الشكل المصنوع من الفولاذ الأنبوبي (هيرليهي 2004، ويلسون 2004، هادلاند وليسينغ 2014)، وسارت كل ماكينات القرن العشرين تقريباً على هذه التصميمات (الشكل 4-19). وقد اكتمل تطور الدراجة



الشكل 4-19

بدأ تطوير الدراجة في مرحلة متأخرة لدرجة تثير الدهشة وتقدم تقدماً بطيئاً. كان على راكبي الدراجات دفع أنفسهم على الدريسين draisine وهي دراجة بارون فون دريس Baron von Drais's البدائية. أضيف البدالان أولاً إلى محور عجلة القيادة عام 1855، وهذا التقدم أدى إلى اختراع الدراجة ثلاثية العجلات في ستينيات القرن التاسع عشر. لكن تسبب تراجع تصميمي

لاحق في ضخامة حجم العجلة الأمامية وفي الكثير من الحوادث. ولم تحظ الدراجة الحديثة بالأمان والكفاءة والبساطة إلا في أواخر ثمانينيات القرن التاسع عشر. (مقتبس من بيرن Byrn ا(1900).

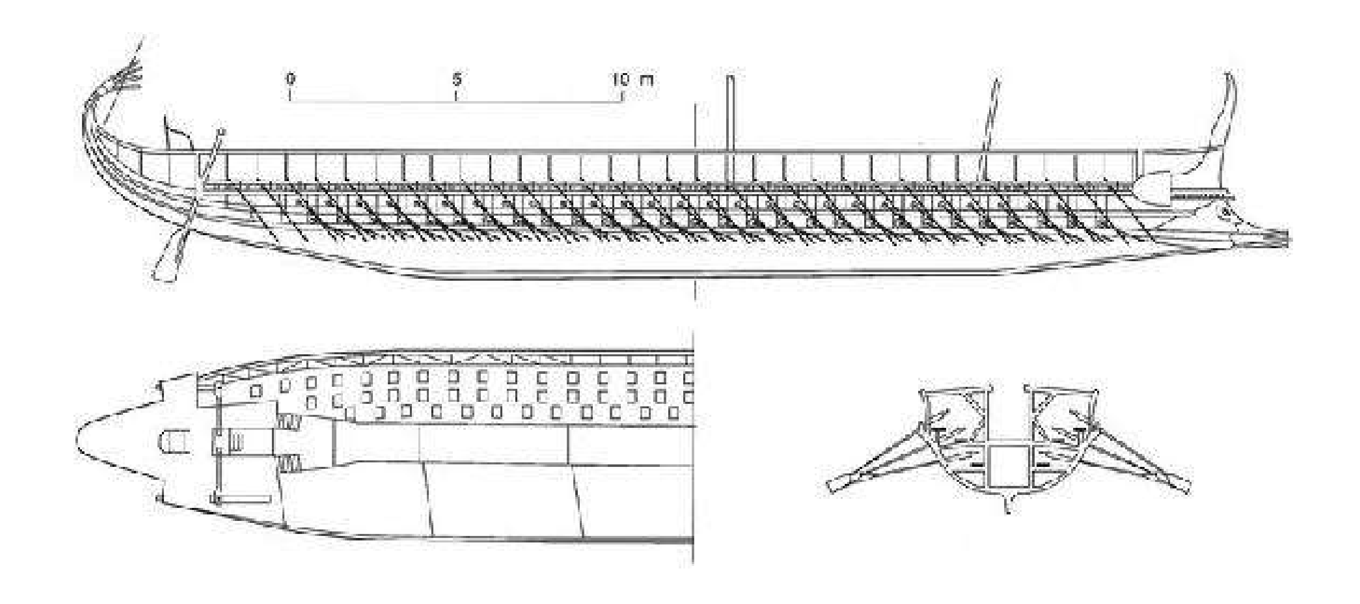
الحديثة بإضافة الإطارات الهوائية ومكابح البدال الخلفي في عام 1889.

وقد شاع استعمال الدراجات المحسنة المزودة بالأنوار وبمختلف معدات التحميل والمقاعد الخلفية للتنقل والتسوق والترويح عن النفس في عدد من الدول الأوروبية وبالأخص هولندا والدنمارك. وقد أدى انتشارها في العالم الفقير إلى مضاعفة مجمل أعدادها في أوروبا. فتاريخ الصين الشيوعية وثيق الارتباط باستعمال الدراجة على نطاق واسع. فحتى أوائل الثمانينيات لم يكن في الصين سيارات خاصة، وحتى أواخر التسعينيات كان معظم الصينيين يركبون الدراجات حتى في المدن الصينية الكبيرة. لكن بناء خطوط قطارات الأنفاق في سائر المدن الرئيسة وارتفاع اقتناء السيارات قلل استعمال الدراجات (لكن التراجع تباطأ بارتفاع شعبية استعمال الدراجات الإلكترونية). إلا أن الطلب الريفي لا يزال قوياً، وما زالت الصين في مقدمة دول العالم في إنتاج الدراجات حيث تنتج أكثر من 80 مليون وحدة سنوياً يصدر منها أكثر من 60% (عالم إبيس IBIS World ا2015).

سفن المجاديف والسفن الشراعية

حقق التحرك على سطح الماء الذي يعمل بالقوة البشرية درجة أعلى ما حققه التنقل البري بالقوة الحية. فقد كانت سفن المجاديف مصممة تصميماً عبقرياً للاستفادة من جهود عشرات بل مئات المجدفين. وبالطبع، فإن الجذب المتعب للمجاديف الثقيلة لمدة طويلة عمل شاق جداً، فما بالك إذا كان في أماكن مغلقة تحت سطح السفينة! إنه يصبح مرهقاً إلى أبعد الحدود. إن إعجابنا بالتصميم المعقد والتنظيم المتقن في سفن المجاديف الضخمة ينبغي أن يقترن بالاعتراف بالآلام الإنسانية التي سببتها حركتها السريعة تلك. ولقد خضعت سفن المجاديف عند قدماء الإغريق إلى الدراسة على نحو خاص (أندرسون 1962؛ موريسون وغاردينر 1995؛ موريسون، كوتس ورانكوف 2000). السفن التي حملت الإغريق إلى طروادة وعلى متنها 50 مجدفاً، كانت تتلقى في فترات قصيرة استطاعة مفيدة قدرها 7 ك واط.

كانت السفن ثلاثية الصفوف (السفن الرومانية ثلاثية المجاديف)، وهي أفضل



الشكل 4-20

منظر جانبي، مخطط جزئي، ومقطع في السفينة الإغريقية أوليمبياس Olympias ثلاثية الصفوف بعد إعادة تركيبها. هناك ستة صفوف مرتبة على شكل الحرف V وتتسع إلى 170 مجدفاً وتستند المجاديف العلوية إلى نقاط دوران خارجية. مقتبسة من كوتس (1989).

السفن الحربية أداء في الحقبة الكلاسيكية، تبحر بقوة 170 مجدفاً (الشكل 4-20). وكان باستطاعة المجدفين الأقوياء دفع السفن بأكثر من 20 ك واط، وهي قوة تكفي لتوليد سرعة قصوى قريبة من 20 كم/سا. وحتى عند التحرك بسرعة قصوى مألوفة أكثر وهي 10-15 كم/سا كانت ثلاثيات الصفوف القادرة على المناورة آلات قتالية جبارة إذ كان باستطاعة رأس الكبش البرونزي أن يخرق سفن الأعداء ويدمرها. ومن المعارك الحاسمة في التاريخ الغربي الهزيمة التي ألحقتها قوة إغريقية صغيرة بالأسطول الفارسي الكبير في سلاميس (480 ق.م.) وذلك باستخدام ثلاثيات الصفوف. كانت أيضاً أهم السفن الحربية في روما الجمهورية. وقد تمت مؤخراً إعادة تركيب بمقياس كامل في ثمانينيات القرن العشرين (موريسون وكوتس 1986؛ موريسون، كوتس ورانكوف 2000).

على أثر وفاة الإسكندر عام 323 ق.م. تسارع بناء السفن رباعية الصفوف وخماسية الصفوف وهكذا. وفي غياب أي دليل على وجود أكثر من ثلاثة صفوف في أي من هذه السفن يفترض أن يشترك رجلان أو أكثر في تحريك مجداف واحد. كان بناء السفينة تيساراكونتيريس *tessarakonteres* في عهد طولومي الفيلسوف Tolemaios ا(222-204 ق.م.) ختاماً لذلك التقدم. فالسفينة التي يبلغ طولها 126 م كان من المنتظر أن تحمل 4.000 مجدف ونحو

3.000 جندي، وأن تكون قادرة نظرياً على الإبحار باستطاعة 5 آلاف واط. لكن وزنها، بما في ذلك معدات المنجنيق الثقيلة، أقعدها عملياً عن الحركة، وهذا خطأ حسابي باهظ التكلفة في بناء السفن.

في البحر الأبيض المتوسط احتفظت سفن المجاديف بأهميتها حتى وقت متأخر من القرن السابع عشر: في ذلك الوقت كان لأكبر السفن الحربية التابعة للبندقية 56 مجدافاً؛ كل منها يحركه فريق من خمسة رجال (بامفورد *Bamford* ا1974؛ كابولي *Capulli* ا2003)، كما كانت زوارق الماوري المحفورة الكبيرة تبحر بقوة العدد ذاته من المحاربين (بما لا يتجاوز 200) وبهذا تكون حدود القوة البشرية بمجموعها في تطبيق قوة التجديف الدائمة بين 12 و20 ك واط. كانت هناك سفن أخرى تبحر بقوة البدالات التي تديرها الأرجل أو عجلات تدور بقوة الساقين (نيدام 1965). في أوروبا ظهرت زوارق أصغر تبحر بقوة 40 رجلاً يحركون عجلات بالأرجل في منتصف القرن السادس عشر. كما كانت القوة الحية وسيلة التحريك الأولى الأساس لنقل البضائع والناس بوساطة الزوارق والصنادل التي تبحر في الأقنية (المربع 4-13).

لعبت القنوات دوراً مهماً في التطور الاقتصادي لاسيما في المنطقة الداخلية من دولة الصين (في الحوض السفلي من هوانغ هي وفي سهل شمال الصين) بدءاً من عهد أسرة هان (نيدام وآخرون 1971؛ ديفيدز 2006). وتعد قناة دا يونهي - القناة العظمى - أهم شرايين النقل وأشهرها. افتتح الجزء الأول منها في مطلع القرن السابع، وأتاح إتمامها عام 1327 للصنادل أن تبحر من هانغجو *Hangzhou* إلى بيجين *Beijin*. ويمثل هذا فارق 10 ^{o} على خطوط العرض ومسافة فعلية تبلغ 1.800 كم تقريباً. كانت القنوات في أوائل عهدها تستخدم مسارات جانبية مزدوجة غير ملائمة حيث كانت الثيران تحمل الزوارق إلى مستوى أعلى. لكن اختراع الأهوسة المائية عام 983 أتاح

المربع 4-13

النقل في القنوات القديمة

إن أقدم وصف لتقدمها البطيء (النوتي الذي يشخر، البغل الذي يرعى) تركه لنا هورس (كوينتوس هوراتيوس فلاكوس *Quintus Horatius Flaccus* ا65-8 ق.م.) في هجائياته *Satires* (بكلي *Buckley* ا1855، 160):

كان النوتي وأحد الركاب، وهما ثملان من تعاطي النبيذ الثقيل، يتنافسان في الغناء والإطراء على عشيقتيهما الغائبتين: وأخيراً، بعد أن نال التعب من المسافر، استسلم للنوم؛ وربط النوتي عنان البغل إلى حجر وهو يرعى العشب، وبدأ يشخر، مستلقياً على ظهره. والآن اقترب النهار، حين وجدنا أن الزورق لم يتحرك؛ حتى أن أحد الركاب قفز من الزورق وضرب رأس البغل وأطراف

البغل والنوتي بـعصا من شجر الصفصاف. وأخيراً كنا بالكاد قد بلغنا الشاطىء في الساعة الرابعة.

رفع الزوارق بطريقة آمنة ومن دون هدر الماء. وكانت سلسلة من الأهوسة ترفع أعلى نقطة في القناة العظمى إلى أكثر من 40 م فوق سطح البحر، وكانت جماعات من العمال أو الثيران أو جواميس الماء تجر زوارق القنوات.

أما في أوروبا فقد بلغت أهمية القنوات أَوْجَها في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر. كانت الخيل أو البغال تسير على طريقين محاذيين للقناة وتجر الصنادل بسرعات تصل إلى 3 كم/سا عندما تكون محملة و5 كم/سا حين تكون فارغة. وبالطبع فإن الميزات الميكانيكية لهذا النوع من النقل واضحة. ففي قناة جيدة التصميم يستطيع حصان ثقيل واحد أن يسحب حملاً وزنه 30-50 طناً، وهذا ثقل يفوق ما يمكن لحصان أن يحمله فوق أفضل الطرقات ذات السطح الصلب. وقد حلت القطارات البخارية تدريجياً محل الحيوانات التي تجر الصنادل، مع أن كثيراً من الخيل استمرت في العمل في القنوات الأصغر خلال تسعينيات القرن التاسع عشر.

في القرن السادس عشر بدأ بناء قنوات النقل في أوروبا في شمال إيطاليا، وهي تقنية مستوردة من دون شك من الصين. وفي عام 1681 تم إنجاز قناة دي ميدي *Du Midi* الفرنسية بطول 240 كم. لم تأت أطول القنوات البريطانية والأوروبية إلا بعد عام 1750 كما أن نظام القنوات الألماني جاء بعد السكك الحديدية (فيل 1990). كانت الصنادل تنقل كميات كبيرة من المواد الخام والبضائع المستوردة للصناعات الآخذة في التوسع وللمدن النامية وتخلصها من نفاياتها، وتتعامل مع قسط كبير من الحركة الأوروبية قبل إدخال القطارات وبعدها ببضعة عقود (هادفيلد *Hadfield*، 1969).

وعلى النقيض من الشحن في القنوات ومن السفن الحربية فإن السفن الشراعية سيطرت على النقل البحري للمسافات البعيدة للمسافرين والبضائع من بداية الحضارات العالية. ويمكننا أن نفهم تاريخ السفن الشراعية بالدرجة الأولى على أنه بحث عن تحول أفضل من الطاقة الحركية للرياح إلى الإبحار الكفء للمراكب.صحيح أن الأشرعة وحدها لم تكن كافية، لكنها من دون شك كانت المفتاح للنجاح البحري، فهي بالأساس صفائح هوائية (لأنها تشكل ما يشبه الصفائح حين تنفخ فيها الرياح) ومصممة للاستفادة القصوى من قوة الرفع والإقلال من المقاومة إلى الحد الأدنى (المربع 4-14). لكن ينبغي الجمع بين القوة التي تتولد عن شكل الصفيحة مع القوة الموازنة لقعر السفينة وإلا انجرفت السفينة مع الرياح (أندرسون 2003).

كانت الأشرعة المربعة التي توضع في زاوية قائمة على المحور الطولي للسفينة بمثابة محولات طاقة كفؤة حين تهب رياح خلفية. فالسفن الرومانية التي تبحر بقوة الرياح الشمالية الغربية كانت تقطع المسافة بين مسينا والإسكندرية في 6-8 أيام، لكن رحلة العودة كانت تستغرق ما بين 40-70 يوماً. إن الإبحار غير المنتظم، والاختلافات الكبيرة من فصل إلى آخر، وتوقف الرحلات

البحرية تماماً في فصل الشتاء (كان النقل بين إسبانيا وإيطاليا يتوقف بين أكتوبر وأبريل) يجعل من المستحيل تقريباً معرفة أي السرعات كانت أنموذجية (دنكان - جونز *Duncan - Jones* ا1990). أما الريح المقابلة في أثناء الرحلات البحرية الأطول فهي بالدرجة الأولى نتيجة تغيير الاتجاه، إذ كانت كل السفن القديمة مزودة بأشرعة مربعة. ومرت فترة طويلة قبل إدخال تصاميم مختلفة اختلافاً جذرياً وانتشارها على نطاق واسع (الشكل 4-21).

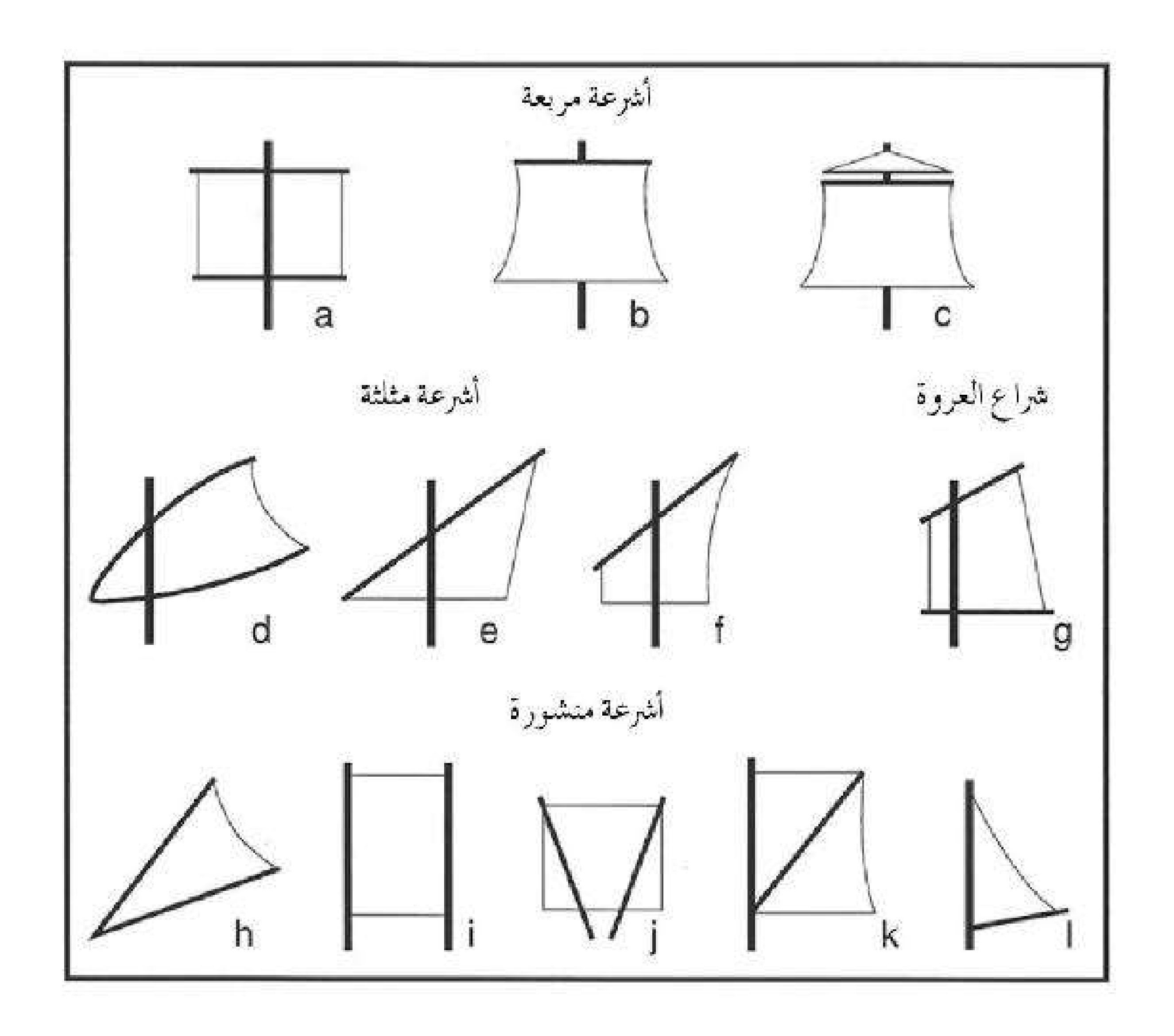
المربع 4-14

الأشرعة والإبحار قرب الرياح.

حين تضرب الريح الشراع يولد فارق الضغط قوتين الأولى دافعة عمودية على الشراع، والأخرى مقاومة تؤثر على امتداد الشراع. فمع هبوب الرياح الخلفية تكون القوة الدفعة أقوى من المقاومة بكثير ما يجعل السفينة تبحر بسرعة نحو الأمام. أما إذا هبت الرياح على الجنب أو بمواجهة السفينة، فإن القوة التي تدفع السفينة من جنبها تكون أقوى من تلك التي تدفعها نحو الأمام. وأما إذا حاولت السفينة الإبحار قرب الريح فإن المقاومة تكون أكبر من الدفع وبذلك تدفع السفينة نحو الخلف. وقد تقدمت أقصى درجات الإبحار قرب الريح أكثر من 100 o منذ بدء الإبحار بالسفن الشراعية. ولم تكن السفن المصرية الأولى ذات الأشرعة المربعة تتخطى 150 o في حين استطاعت سفن العصور الوسطى أن تبحر بطيئة والرياح تهب على جنبها (90 o) في حين أن السفن التي أتت بعدها في عصر ما بعد عصر النهضة لم تكن تبحر في زاوية أكثر من 80 o في وجه الرياح. ولم يصبح الإبحار القريب من الرياح ممكناً إلا بعد استخدام أشرعة غير متناظره مركبة على امتداد المحور الطولي للسفينة والقادرة على الدوران حول الصواري.

كان بمقدور السفن المزودة بأشرعة مربعة أن تحقق زاوية 60 o وكان باستطاعة الأشرعة الأمامية والخلفية (بما فيها المثلثة، والمربعة وعمود الشراع، والقرية - عارضة يمدد عليها رأس الشراع) أن تقترب حتى 45 o من الرياح. أما اليخوت الحديثة فتستطيع الاقتراب حتى 30 o وهذا هو الحد الأقصى للديناميكا الهوائية. كانت الطريقة الوحيدة للالتفاف على الحدود السابقة هي التقدم تحت أفضل زاوية يمكن التحكم بها والاستمرار في تغيير الاتجاه. وكان على السفن المزودة بأشرعة مربعة اللجوء إلى الانعطاف دورة كاملة مع الريح. أما السفن المزودة بأشرعة أمامية وخلفية فحاولت توجيه مقدمتها نحو الرياح والتقاط الريح على الطرف المعاكس من الشراع.

كان للسفن أشرعة أمامية وخلفية وأخرى ممتدة على طول محور السفينة، كما كانت الأشرعة تدور حول محاور الصواري لتلتقط الرياح. كان باستطاعة السفن تغيير اتجاهها بسهولة أكبر بمجرد الدوران في مواجهة الرياح والإبحار في مسار



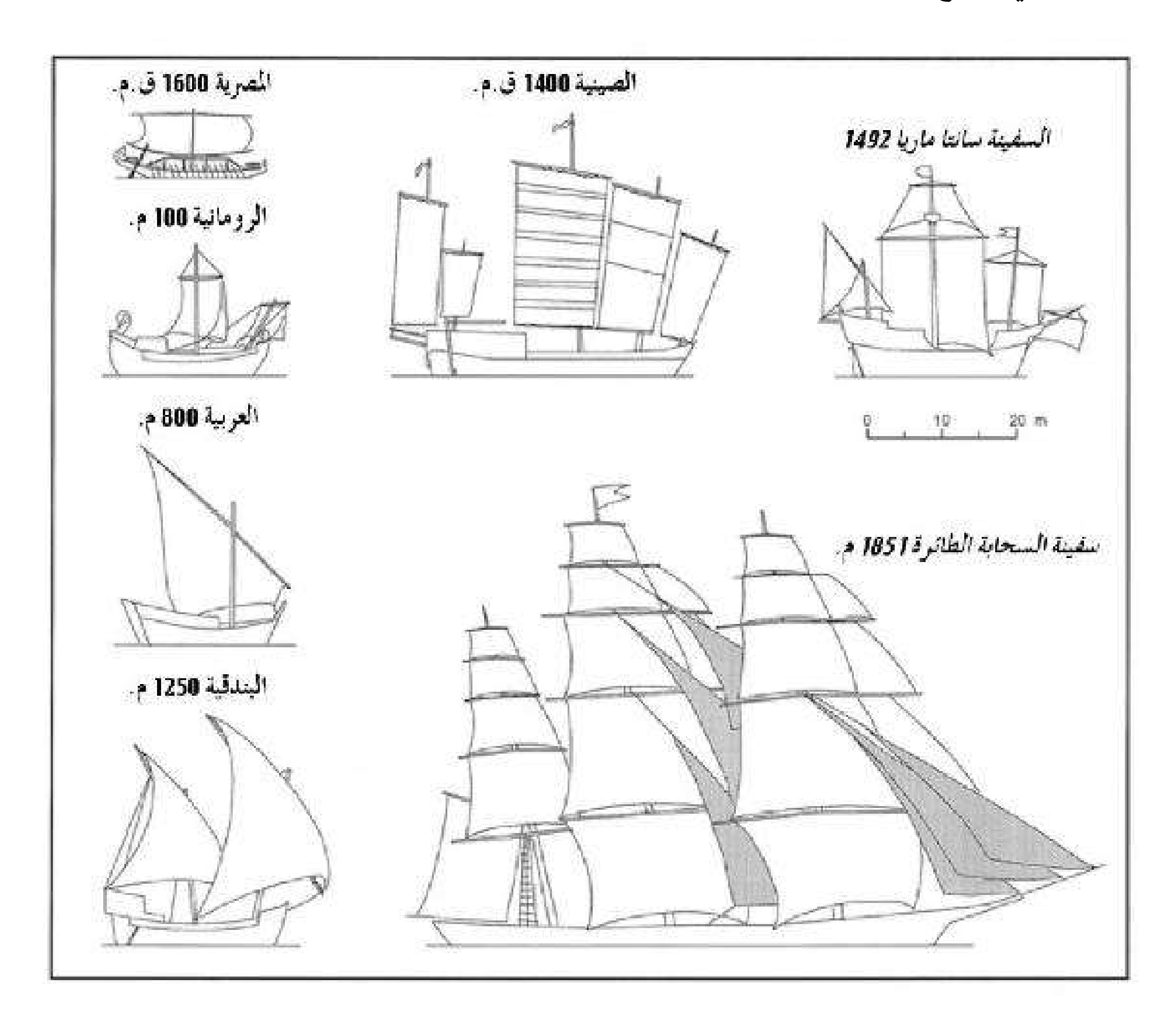
الشكل 4-21

الأنواع الرئيسة من الأشرعة. الأشرعة المربعة (a) المستقيم، أو العريض من الأسفل (b)، هما أقدم الأنواع. الأشرعة المنشورة كانت منتشرة في بولونيزيا، وميلانيزيا (i) والمحيط الهندي (j) وأوروبا (k.l). الصواري وسائر الأجزاء الداعمة (أعمدة التطويل والأذرعة وعوارض رأس الشراع) مرسومة بخط سميك والأشرعة لا تظهر بحسب مقاييسها الحقيقية. مأخوذة من نيدام وفريقه (1971) ووايت (1984).

متعرج. وأغلب الظن أن التثبيت الأمامي والخلفي أتى أولاً من جنوب شرق آسيا على شكل شراع مستطيل مائل. وقد استعملت الأنواع المعدلة من هذا التصميم القديم في الصين وأوروبا مروراً

بالهند. كما منحت الدعامات الخشبية المميزة الأشرعة الصينية مزيداً من القوة عند الإبحار منذ القرن الثاني ق.م. وشاع استعمال الشراع المربع المائل في المحيط الهندي في القرن الثالث ق.م. وبذلك سبقت الأشرعةَ المثلثة التي ميزت العالم العربي بعد القرن السابع.

لم يكن توسع الفايكينغ (الذي وصل إلى غرينلاند ونيوفاوندلاند غرباً) ممكناً لولا استخدامهم عدداً كبيراً من الأشرعة الصوفية المربعة أو المستطيلة الواسعة. ويذكر أن إنتاج تلك الأشرعة عمل شاق يتطلب كثيراً من الجهد (فصانع واحد يستعمل سدى عمودياً ولحمة أفقية يحتاج إلى خمس سنوات لكي يصنع شراعاً



الشكل 4-22

تطور السفن الشراعية. استخدمت المجتمعات القديمة في البحر المتوسط أشرعة مربعة الشكل. وقبل أن يتبناها الأوروبيون كانت الأشرعة المثلثة هي السائدة في المحيط الهندي. وتمثل السفينة الشراعية الصينية الضخمة التصاميم الصينية الكفؤة. وكان لسفينة كريستوافر كولومبوس سانتا ماريا Santa Maria أشرعة مربعة الشكل، شراع أمامي وآخر مثلث الشكل على السارية الوسطى وشراع منشور على العمود تحت الدقل في مقدمة السفينة. وكانت السحابة الطائرة Flying Cloud وهي سفينة أمريكية شهيرة في منتصف القرن التاسع عشر اشتهرت بتحطيمها الرقم القياسي، كانت مزودة بأشرعة أمامية، وشراع خلفي مثلث الشكل، وشراع رئيس صغير عالٍ والأشرعة العلوية. والمخططات المبسطة مستقاة من صور في آرمسترونغ Armstrong ا(1969)، و دوماس Daumas ا(1969) ونيدام وفريقه (1971) وقد روعيت المقاييس في الرسم.

واحداً مفرداً مساحته 90م^2) بصرف النظر عن الحاجة إلى تحويل الأرض إلى مرعى والعناية بقطعان الغنم لإنتاج ما يكفي من الصوف لأن الأساطيل الشمالية الكبيرة كانت تقوم على العمالة التي يوفرها العبيد (لولر Lawler ا2016). بعد انتهاء رحلات الفايكينغ استخدمت الأشرعة الصوفية الكبيرة في شمال الأطلسي (بين أيسلندا واسكندينافيا، بما فيها جزر هبريدس وشتلاند) حتى القرن التاسع عشر (فايكينغ اسكيبز موزيت Vikingeskibs Museet ا2016).

أما في أوروبا فقد كان الجمع بين الأشرعة المربعة والأشرعة المثلثة في العصور الوسطى وحده هو الذي جعل الإبحار قرب الريح ممكناً. وبالتدريج زودت هذه السفن بأعداد كبيرة من الأشرعة الأعلى والقابلة للتعديل (الشكل 22.4). فتصاميم جسم السفينة الأفضل والأعمق، والدفة المتمفصلة مع مؤخرة السفينة (التي استخدمت في الصين منذ القرن الأول م، وفي أوروبا بعدها بألف عام) والبوصلة المغناطيسية (في الصين بعد 850، في أوروبا في نحو 1200) جعلتها محولات طاقة فريدة في كفاءتها. وبإضافة المدافع الثقيلة الدقيقة اكتسبت هذه المجموعة قوة لاتقاوم. فالسفينة الحربية التي طورت في أوروبا الغربية في القرنين الرابع عشر والخامس عشر أطلقت عصر التوسع بعيد المدى بشكل لم يسبق له مثيل. وجاء في الوصف الملائم الذي قدمه سيبولا Cipolla ا(1965، 137) أن السفينة

كانت جهازاً متكاملاً أتاح لطاقم صغير نسبياً السيطرة على قدر هائل لا مثيل له من الطاقة الصماء للتحرك والتدمير. هنا يكمن سر صعود نجم أوروبا المفاجئ والسريع.

في أواخر القرن الثامن عشر ومطلع القرن التاسع عشر بلغت هذه السفن أقصى أحجامها وزودت بالمزيد من المدافع. وانتهت المنافسة البحرية بين بريطانيا وفرنسا بالتفوق البحري البريطاني. لكن السفن التي هيمنت على البحار قبل أن تحل محلها السفن البخارية كانت ذات تصميم فرنسي أصلي

لسفينة حربية من طابقين (طول طابق المدافع فيها نحو 54 م، وتحمل 74 مدفعاً وطاقم بحارة من 750 رجلاً). وفي

المربع 4-15

رحلات الاكتشاف البرتغالية

تقدم البحارة البرتغاليون أولاً نحو الجنوب على امتداد السواحل الأفريقية الغربية: فوصلوا إلى مصب نهر السنغال عام 1444، وعبروا خط الاستواء عام 1472، ووصلوا إلى أنغولا اليوم عام 1486، وفي عام 1497 دار فاسكو دا غاما Vasco da Gama ا(1460 - 1524) حول رأس الرجاء المصلحة وعبر المحيط الهندي نحو الهند (بوكسر Boxer ا1969؛ نيويت Mewitt ا2005). لويس دي كامويش Luís de Camões ا(1525 - 1580) في ملحمته العظيمة أوس لوسياداس Os Lusíadas التي نشرت عام 1572 وأوردها هنا من ترجمة ريتشارد بيرتون (بيرتون 1880، 11) وصف تقدمهم قائلاً:

يمخرون عباب الماء الأزرق الفسيح

يشقون الرياح المضطربة في طريقهم

حيث تهب الريح الرؤوم ناعمة صدوقة

والأشرعة المنتفخة تنتفخ في لهوها

والبحار مكسوة بالزبد الأبيض

يلمع حيث تفتح مقدمة السفينة

فضاء ذلك المحيط المقدس

ويحرث ثور بروتيوس أرضه.

نهاية المطاف أدخلت البحرية البريطانية في الخدمة نحو 150 من هذه السفن العملاقة (واتس Watts ا1905؛ كيرتيس Curtis ا1919) وضمنت بريطانيا السيطرة البحرية قبل العصر

النابليوني وبعده. وبدءاً من أوائل القرن الخامس عشر كانت أبسط السفن من هذا التصميم المبتكر تحمل على متنها البحارة البرتغاليين الشجعان في رحلات أطول (المربع 4-15).

في عام 1492 عبرت الأطلسي ثلاث سفن إسبانية بقيادة الكابتن كريستوافر كولومبوس Christopher Columbus ا(1451-1506). وفي عام 1519 عبر فرديناند ماجلان Ferdinand Magellan ا(1480-1521) المحيط الهادي، وبعد مقتله في الفيليبين تولى خوان سباستيان إلكانو Juan Sebastián Elcano ا(1476-1526) قيادة سفينته - فيكتوريا - وأكمل أول رحلة حول الأرض. وتتيح لنا السجلات التاريخية الغنية تتبع حمولة أفضل السفن الشراعية والسفن العادية وسرعاتها التي استعملت خلال التوسع الاستعماري ونمو التجارة البحرية (تشاترتون 1914؛ أندرسون 1926؛ سيبولا 1965؛ مورتون 1975؛ كاسون 1994؛ غاردينر 2000). صحيح أن الرومان بنوا سفناً سعتها أكثر من 1.000 طن إلا أن حمولة سفن الشحن القياسية كانت أقل من 100 طن.

بعد ذلك بأكثر من ألف عام، شرع الأوروبيون باكتشافاتهم في سفن من ذات الحجم الصغير. وفي 1492 بلغت حمولة سفينة كولومبوس سانتا ماريا 165 طناً وسفينة ماجلان ترينيداد 85 طناً. بعدها بقرن من الزمن كان متوسط حمولة سفن الأسطول الإسباني العظيم (عام 1599) 515 طناً. وفي عام 1800 بلغت حمولة السفن البريطانية في الأسطول الهندي نحو 1.200 طن. وبينما لم تتجاوز سرعة سفن الشحن الرومانية 2-2.5 م/ثا، كان باستطاعة سفن منتصف القرن التاسع عشر أن تبحر بسرعة تتجاوز 9 م/ثا. في عام 1853 سجلت السفينة البريطانية لايتنينغ Lightning التي بنيت في بوسطون وعلى متنها بحارة بريطانيون، أطول مسافة تقطعها سفينة في اليوم: كانت مسافة 803 كم تقسم إلى سرعة متوسطة قدرها 9.3 م/ثا (وود Wood ا1922). أما كتي سارك التي قد تكون أشهر سفينة نقل شاي في العالم فقطعت في عام 1890 مسافة 6.000 كم من دون توقف في 13 يوماً بسرعة متوسطة قدرها 5.3 م/ثا (آرمسرونغ Armstrong ا1969).

ولا بد من طرح العديد من الافتراضات القابلة للتساؤل لحساب إجمالي الطاقة اللازمة إما لإبحار السفن المنفردة في رحلات طويلة أو التي تسخرها الدولة سنوياً في أساطيلها التجارية أو العسكرية. ويرى أنغر (1984) أن إسهام السفن الشراعية في استعمال الطاقة على مستوى البلاد خلال العصر الذهبي لهولندا كان يساوي تقريباً منتج الطواحين الهوائية كلها في هولندا - أي أقل من 5% من استهلاك البلاد الهائل من الخث[26] (المربع 4-16). ربما كان من الصعب حساب مجموع طاقة الإبحار، لكن من المؤكد أن توسع النقل البحري (قبل التوسع الاقتصادي بصفة عامة) وتزايد إنتاجيته كانا من الإسهامات الحيوية في نمو اقتصاد أوروبا بين 1350 و1850 (لوكاسن Lucassen وأونغر Unger ا2011).

المباني وهياكل البناء

يمكن اختصار التنوع الكبير في أنماط البناء والتزيينات في أربعة أعضاء بنيوية أساسية: الجدران والأعمدة والجسور والأقواس. ولم يحتج صنع هذه الأعضاء إلا إلى الجهد البشري والاستعانة ببعض الأدوات البسيطة لصنعها من مواد البناء الثلاث الأساس المتوافرة في العالم ما قبل الصناعي وهي الخشب، والحجر، والطوب سواء أكان مجففاً بالشمس أو مشوياً بالفرن. كان من الممكن قطع الأشجار وتصنيع الأشكال الخشبية اللازمة باستخدام الفأس والقدوم. أما الأحجار فكان من الممكن اقتلاعها باستعمال المطارق والأسافين وتشكيلها بالأزاميل. وبالمثل يمكن صنع الطوب المجفف بالشمس من الطين المتوافر في الطبيعة. لكن قلة الأشجار الضخمة قللت من استخدام الخشب في كثير من المناطق كما أن نقل الأحجار المكلف جعل اختيارها مقصوراً في معظم الأحوال على الأنواع المحلية. أما التشكيل الفني الدقيق ونحت التفاصيل على الخشب والحجر فكانت تزيد من كلفة الطاقة المتعلقة باستعمال هذه المواد إلى حد كبير.

يعد الطوب المجفف بالشمس، الذي شاع استخدامه في الشرق الأوسط وفي أوروبا المطلة على البحر المتوسط، أقل أحجار البناء كثافة من حيث الطاقة، إذ أُنتِجَ بأعداد هائلة حتى في أقدم المجتمعات الحضرية. وجاء في الملحمة السومرية جلجامش وصف لمدينة الوركاء هو أولى الوثائق الأدبية المحفوظة التي تعود إلى ما قبل 2500 ق.م. (غاردنر 2011): «قسم مدينة، وقسم بساتين، وقسم حفر الطين.

المربع 16-4

إسهام السفن الهولندية في استعمال الطاقة

لا نملك معلومات ملائمة حول الحمولات والسرعات تتيح لنا حساب الطاقة اللازمة لتحريك السفن كل على حدة في رحلات طويلة أو الوقوف على مجموع الإسهامات السنوية لطاقة الرياح التي تستفيد منها الأساطيل التجارية أو الحربية. فالمتغيرات المهمة - مثل تصميم جسم السفينة، ومساحات الأشرعة وأشكالها، وأوزان الحمولة ومعدلات الاستفادة - كلها عشوائية جداً بحيث لا تسمح بتقدير المتوسط المطلوب تقديراً صحيحاً. ومع ذلك، وضع أونغر (1984) مجموعة من الافتراضات لحساب إسهام السفن الشراعية في استعمال الطاقة في هولندا خلال العصر الذهبي الهولندي وتوصل إلى مجموع سنوي قدره 6.2 ميغا واط في القرن السابع عشر. وبغرض المقارنة فإن هذا يساوي بالضبط تقريباً الطاقة المستمدة من الطواحين الهوائية الهولندية كما قدرها دو زيو De Zeeuw ا(1978) - إلا أنه لا يمثل سوى قدر ضئيل (ا<5%) من استهلاك البلاد الهائل من مادة الخث.

لكن مثل هذه المقارنات الكمية مضللة: فما من كمية من الخث تستطيع أن تجعل الرحلات إلى جزر الهند الشرقية ممكنة؛ فالطاقة المفيدة التي يوفرها الخث هي على الأرجح أقل من ربع قيمة الحرارة الإجمالية؛ وهناك بالطبع التناقض الأساس في مقارنة ترسبات محدودة وغير متجددة (أو غير متجددة في مقياس زمني تاريخي) لوقود أحفوري جديد ومصدر غني ومتجدد يعاد شحنه

باستمرار من خلال اختلافات بالضغط الجوي. فمقارنات مجمل الاستطاعة ليست أدق من تلك المتعلقة بتحويل الكفاءات النوعية (في هذه الحال مقارنة كفاءة الشراع بأداء موقد يعمل بإحراق الخث).

كانت مدينة الوركاء تتألف من ثلاثة أقسام بما فيها حفر الطين». كانت أحجار الطوب تصنع من كتل من الطين والماء والتبن أو القش المقطع، وقد يضاف أحياناً الروث والرمل ويتماسك المزيج بسرعة ويتخذ شكله في قوالب خشبية تترك لتجف في الشمس (كانت 250 قطعة تصنع في ساعة واحدة). وتتراوح الأبعاد بين قطع بابيلونية مربعة الشكل (40 اxا 40 اxا 10 سم) ورومانية رقيقة مستطيلة (45 اxا 30 اxا 3.75 سم). وبما أن الطوب الطيني لا ينقل الحرارة فقد ساعد في الحفاظ على برودة البناء في المناخ الحار الجاف. ولأحجار الطوب ميزة ميكانيكية مهمة: فبناء قوس من الطوب لا يحتاج إلى جسر خشبي داعم (فان بيك Van Beek ا1987)، وباستعمال الطين وتوافر العمالة المناسبة يمكن إنتاج كميات هائلة من الطوب.

استعمل الطوب المشوي في بلاد ما بين النهرين القديمة قبل انتشاره فيما بعد في الإمبراطورية الرومانية والصين في عهد أسرة هان. وظلت عملية الشي لقرون عدة تقام في أكوام أو حفر مفتوحة ما أدى إلى ضياع قدر كبير من الوقود وعدم التجانس في شي الغضار. لذا حين تحول الشي فيما بعد إلى الأكوام أو الصفوف المنتظمة صار بالإمكان رفع درجة الحرارة إلى 800 ^{o} مئوية والحصول على إنتاج أكثر تجانساً وكفاءة. فالأفران الأفقية محكمة الإغلاق ضمنت كفاءة الاحتراق وتجانسه. كان لهذه الأفران مداخن أبعادها موزعة توزيعاً جيداً، وكانت الغازات الساخنة المنبعثة منها تنعكس نحو الأسفل من سقوف مكورة كالقباب - لكنها كانت تحتاج إلى الخشب أو الفحم لكي تعمل. أما في أوروبا فقد ازدادت هذه الاحتياجات حين حل الطوب محل الأسيجة المضفرة والجص أو الهياكل الخشبية الداخلية وحين شاع استخدامه في الأساسات ناهيك عن الجدران.

وبصرف النظر عن مواد البناء الأساس المستعملة في مباني العصر ما قبل الصناعي فقد أثبتت جدواها في جمع أعداد كبيرة من الرجال (بمن فيهم البناؤون من ذوي الخبرة) أو الرجال والحيوانات الذين أنجزوا أعمالاً جبارة حتى في مقاييس اليوم السائدة في عالم سيطرت عليه الميكنة. كانت الأحجار كلها تقطع باليد، ثم تقوم الحيوانات بنقل الأحجار المقطعة إلى مواقع البناء، أو تسخّر أحياناً لتحريك العتلات اللازمة لرفع القطع الثقيلة إلى مستويات أعلى، وفيما عدا ذلك اعتمد البناء التقليدي على العمالة البشرية وحسب حيث استعمل الحرفيون المناشير والفؤوس والمطارق والأزاميل وأدوات التسوية، والمثاقب المدببة أو اللولبية، والموالج (أدوات الصقل أو التسوية) والبريمات (أدوات الثقب) بالإضافة إلى الملافيف أو الرافعات، والعجلات التي تدار بالأقدام لرفع الأخشاب والأحجار والزجاج (ويلسون Wilson ا1990).

كان من السهل على الرافعات التي يشغلها رجال يديرون أحجار الرحى أو العجلات التي تدار بالأقدام أن تقوم بذلك العمل، ولو كان ذلك ببطء. فبعض الالات -بما فيها رافعة فيليبو برونليسكي Filippo Brunelleschi ا(1377-1446) التي تديرها الثيران، كانت ترفع مواد البناء لتعمير كاتدرائية سانتا ماريا دل فيوري

المربع 4-17

آلات برونليسكي العبقرية

تعد كاتدرائية سانتا ماريا دل فيوري التي أنجزها فيليبو برونليسكي دليلاً كاملاً على الأدوار التي لعبتها المخترعات العبقرية في تسخير كمية الطاقة اللازمة تسخيراً ملائماً. فبالرغم من توافر حيوانات الجر والعمال لتقديم القوة اللازمة، إلا أن حجم القبة (قطرها الداخلي 41.5 م) وطريقة بنائها التي لا مثيل لها (من بدون أي سقالات تقوم على أساسات أرضية) ما كان بالإمكان إنجازها لولا آلات برونليسكي الجديدة العبقرية (برايجر وسكاغليا 1970؛ كينغ 2000؛ ريتشي Ricci ا2014). صحيح أن هذه الآلات كانت تفكك حين انتهاء أعمال البناء، لكن رسوماتها حفظت في كتاب بوناكورسو غيبرتي Buonaccorso Ghiberti's زيبالدوني Zibaldone.

وتشمل هذه الآلات روافع تستند إلى الأرض وأخرى عالية، وبَكرة تعمل بطريقة معكوسة، ورافعة دوارة تستخدم في بناء الفانوس، وبكرات دقيقة. ولعل أكثر الأجزاء عبقرية هو موضع الحمولة (ليس بالضرورة من اختراع برونليسكي لكنه بالتأكيد الذي نفذ الفكرة بعبقرية) التي ترفع إلى القبة بوساطة ملفاف مركزي (يلفه ثور) يرفع أحجار الطوب بسهولة إلى البنائين الذين يعمرون البناء المنحني الصاعد. لكن لم يكن من الممكن رفع قطع الأحجار الثقيلة المستعملة في عقد الأقواس (اللازمة لمنع توسع البناء) من الموقع المركزي المرتفع إلى مواقعها المحددة تحديداً دقيقاً من قبل من خلال العمود ومزودتين بوساطة الجر أو الدفع: كان العمل يتم من خلال واضع الحمولة مع مزلجتين أفقيتين مركبتين على عمود مزود بثقل مكافئ.

Santa Maria del Fiore في فلورنسا ورافعة دوارة لتثبيت المصباح في الأعلى (برايجر Prager وسكاغليا Scaglia ا1970)- صممت خصيصاً للمهمات الصعبة المحددة (المربع 4-17). بعض المشروعات أنجزت بسرعة: البارثينون في 15 عاماً (447-432 ق.م.) البانثيون في ثمانية أعوام (118-125م) وآية صوفيا، وهي كنيسة بيزنطية في القسطنطينية ذات قباب عالية تحولت فيما بعد إلى مسجد، في أقل من خمسة أعوام (527-532).

ويبرز لنا العديد من نماذج مشروعات الأبنية الضخمة أشهرها الأبنية التي تجسد مختلف الاحتفالات وأهمها النصب التذكارية وأماكن العبادة. أما أبرز أبنية الصنف الأول فهي الأهرامات

والقبور التي تتميز بضخامتها، في حين أن المعابد والكاتدرائيات تجمع بين كونها نصباً تذكارية وبين التعقيد والجمال. ومن مباني العصر ما قبل الصناعي أختار السواقي لأن طولها يجمع بين القنوات، والأنفاق، والجسور والسيفونات المقلوبة. لكننا لا نستطيع إعداد تقارير عن الطاقة الخاصة ببناء المباني القديمة، فحتى كلفة الطاقة الخاصة ببناء مشروعات في العصر الوسيط يصعب تقديرها. لكن التقديرات التقريبية تبين فوارق كبيرة في الطاقة اللازمة، وفوارق أكبر في متوسط تدفق القدرة.

أما الأضرحة أو النصب الدينية التي تحتاج إلى قدر ضخم ومستدام من تدفق الطاقة - أي تخطيط طويل الأجل، وتنظيم دقيق، وحشد عمالة واسعة النطاق - فقد شيدتها كل الثقافات التي سبقت العصر الصناعي (تشينغ Ching، يارزومبك Jarzombek، وبراكاش Prakash ا2011). وتعبر هذه الأضرحة والمعابد عن كفاح الإنسان في كل مكان لتحقيق الخلود، والكمال، والتفوق (الشكل 23-4). وأحب كثيراً أن أقول شيئاً محدداً عن عملية بناء الأهرامات المصرية ومتطلبات الطاقة التي اقترنت ببنائها باعتبارها أضخم بناء في العالم القديم. فنحن نعرف أن بناءها احتاج إلى تخطيط طويل الأجل، وعمليات لوجستية كفؤة وإشراف وخدمات فعالة، ومهارات فنية تستحق الإعجاب بالرغم من غموضها بالنسبة إلينا بالكامل تقريباً.



الشكل 4-23

هرم خوفو في الجيزة، وهرم الشمس في تيوتيهواكان، وجيتافانا ستوبا في أنورادابورا، وتاشوغا زنبيل زيغورت في إيلام. ويمكن الحصول على معلومات إضافية حول هذه الصروح من بندرانايكا Bandaranayke ا(1974)، تومكينز Tompkins ا(1976) وتشينغ Ching، جرزومبك Jarzombek وباراكاش Prakash ا(2011).

وأفضل ما يجسد كل هذه الصفات هو الهرم الأكبر، قبر الفرعون خوفو من الأسرة الرابعة. هذا الصرح الهائل المبني من 2.5 مليون حجر يزن في المتوسط نحو 2.5 طن. هذه الكتلة التي تزن أكثر من 6 ملايين طن وحجمها 2.5 مليون م^3 تم تجميعها بدقة متناهية وبسرعة تستحق الإعجاب. من موقع هرم الجيزة (بالاستعانة بموقعي نجمين قطبيين هما المئزر والسُّها) نستطيع تحديد بداية بنائه بين 2485 و2475 ق.م. (سبنس Spence ا2000) ونهايته بعد 15-20 سنة. وخلص علماء الآثار المصرية إلى نتيجة مفادها أن أحجار الداخل اقتلعت من موقع الجيزة، وحمِلت أحجار الواجهة من مقالع طرة عبر نهر النيل، بينما شحنت أضخم الأحجار، وهي التي تشكل طنف (دعامة) السقف داخل الهرم (أثقلها وزنه نحو 80 طناً) من جنوبي مصر (ليبريه *Lepre* ا1990؛ لينر *Lehner* ا1997).

كل ذلك يبدو منطقياً. فقدماء المصريين أتقنوا قطع الأحجار من مقالعها سواء من حيث تماثل أحجام الكتل الحجرية المقطوعة أو اقتلاع القطع الضخمة، كما استطاعوا نقل الأجسام الثقيلة براً أو على متن القوارب. وتوضح لوحة معروفة كيف نقل 127 رجلاً حجراً يزن 50 طناً من كهف في البرشة (1880 ق.م.) (مطورين استطاعة مفيدة تصل إلى أكثر من 30 ك واط) على مزلجة قلل العمال شدة الاحتكاك فيها بصب الماء عليها. وهناك صورة فريدة من دير البحري تثبت أن تلك الأحجار الهائلة كانت تنقل على القوارب: وقد حُمِلت مسلتان من مسلات الكرنك طول كل منهما 30.7 م على صندل طوله 63 م يحركه نحو 900 مجدّف يجلسون في 30 قارباً (نافيل Naville ا1908).

لكن باستثناء قطع الأحجار ونقلها إلى موقع البناء فإن معرفتنا بالموضوع لا تخرج عن نطاق التخمين؛ فنحن لا نزال نجهل كيف بنيت أضخم الأهرامات (تومبكينز Tompkins ا1971؛ مندلسون Mendelssohn ا1974؛ هوجز Hodges ا1989؛ غريمال Grimal ا1992؛ فير Wier ا1996؛ لهنر Lehner ا1997؛ إدواردز Edwards ا2003). إن السجل المصري الهيروغليفي - التصويري الغني في كثير من الجوانب الأخرى لا يعطينا أي تصوير أو وصف معاصر. فأكثر الفرضيات الحديثة انتشاراً تحدد استعمال السطوح المائلة المصنوعة من الطين والطوب والأحجار من دون الإجماع حول شكلها (مستوى مائل واحد، أو مستويات متعددة، أو مردوان دائري[27] واحد؟) أو مزلجة مائلة (مع معدلات مقترحة تصل إلى 1: 3 ارتفاعاً و1: 10 انخفاضاً). لكن مثل هذه الاختلافات غير ذات بال على أساس أن من غير المرجح استعمال أي مزالج من الأساس (هوجز 1989).

كان من الضروري إقامة مستوى مائل واحد جديد بعد الانتهاء من بناء كل طبقة من الحجر، ومع منحدر قابل للتعامل يميل بدرجة 10: 1 فإن حجمه كان ليتجاوز حجم الهرم ذاته، إذ يفترض أن تكون المزالج المحيطة بالهرم ضيقة؛ يصعب تماماً بناؤها، وتدعيمها، وصيانتها في ظروف الاستعمال القاسية؛ والمرور عليها خطر إن لم نقل مستحيلاً. واقترح بعضهم حلاً يعتمد على الحبال التي تلتف بزوايا قائمة عند الأركان، لكننا لا نملك دليلاً يثبت قدرة المصريين على فعل ذلك أو يبين أن ذلك الحل كان ممكناً فعلاً. على أي حال، ليس ثمة بقايا من كتل الأنقاض الهائلة تلك التي يخلفها بناء المزلجة في أي موقع من هضبة الجيزة.

وأقدم وصف لبناء الأهرامات هو ما كتبه هيرودوت (484-425 ق.م.) بعد اكتمالها بألفي عام. ففي أثناء رحلاته في مصر قيل له:

إن بناء الهرم ذاته استغرق عشرين عاماً، وإن الهرم قاعدته مربع طول ضلعه ثمانمائة قدم، وارتفاعه ثابت.... هذا الهرم بني بطريقة الدرج التي يسميها بعضهم «صفوفاً» وآخرون «قواعد»: في البداية كانت الأحجار ترفع بآلات مصنوعة من قطع خشبية صغيرة من الأرض إلى المرحلة الأولى من الدرج، فإذا بلغ الحجر ذلك الموقع، وضع على آلة أخرى مثبتة على المرحلة الأولى، ومنها كان يسحب على آلة أخرى إلى المرحلة الثانية. كان عدد الآلات يماثل عدد الدرجات، أو ربما نقلوا الآلة ذاتها التي تصنع بطريقة يسهل نقلها إلى كل مرحلة واحدة تلو أخرى لكي ترفع الأحجار؛ وكلتا الروايتين متداولتان. ومهما يكن الأمر، كان من الواجب إنهاء القسم الأعلى منها قبل الانتقال لإنهاء القسم الذي بعده، وأخيراً أنهوا الأقسام القريبة من الأرض وأخفض المستويات.

المربع 4-18

كلفة الطاقة الخاصة بالهرم الأكبر

تبلغ طاقة الهرم الأكبر الكامنة (اللازمة لرفع كتلة الأحجار بحجم 2.5 مليون م^3 من الحجر) نحو 2.5 تريليون جول وقد أصاب فير حين توصل إلى ذلك الرقم، لكن تقديره متوسط العمل المفيد بنحو 240 كيلو جول/يوم كان منخفضاً جداً. فيما يلي افتراضاتي الحذرة. إن قطع 2.5 مليون م^3 من الحجر في 20 عاماً (فترة حكم خوفو) يتطلب 1.500 عامل في المقلع يعملون 300 يوم في السنة وينتجون 0.25 م^3 من الحجر لكل فرد باستعمال أزاميل من النحاس ومطارق تسوية من صخر الدولرايت البركاني. وحتى لو افترضنا أن تربيع الأحجار وتشذيبها يحتاج إلى ثلاثة اضعاف الحجارين (مع أن كثيراً من الأحجار الداخلية كانت تجهز بطريقة النحت الخشن) ونقلها إلى موقع البناء، فإن إجمالي القوة العاملة التي توافر مواد البناء سيكون في حدود 5.000 رجل.

وإذا اعتبرنا أن المدخل اليومي من الطاقة المفيدة في حدود 400 كيلو جول/للفرد فإن رفع الأحجار يتطلب نحو 6.25 مليون يوم عمل، وبتقسيم هذه المدة على 20 سنة و300 يوم عمل في السنة يبين أن بإمكان 1.000 عامل أن ينجزوا العمل. ولو احتاج الأمر العدد نفسه لوضع الأحجار في مكانها في البناء الصاعد، وحتى لو تضاعف هذا العدد ليعكس أعمال التنظيم والمراقبة وللقيام بأعمال النقل وإصلاح المعدات وتوصيل الطعام وإعداد وجبات الطعام وغسل الثياب فإن المجموع العام سيكون أقل من 10.000 رجل. في أثناء ذروة العمل في الأهرامات كان العمال في الجيزة يستثمرون معاً 4 جيجا جول من الطاقة الميكانيكية المفيدة في كل ساعة،

أي استطاعة شاملة قدرها 1.1 ميغا واط، وللحفاظ على هذا الجهد كانوا يستهلكون 20 جيغا جول إضافية من الطاقة الغذائية أي ما يعادل 1.500 طن من القمح تقريباً.

قدر فير (1996) عدد بنائي الهرم بنحو 13.000 رجل على مدى العشرين عاماً. في حين قدر هوجز أن 125 فريقاً استطاعوا رفع كل الأحجار إلى أماكنها في 17 عاماً، وأن العدد قد يتضاعف حتى 1.000 فقط من العمال الدائمين لرفع الأحجار. كما ترك ثلاث سنوات لأحجار الإكساء الخارجي بدءاً من القمة. وفي المقابل، سمع هيرودوت عن 100.000 رجل يعملون ثلاثة أشهر على مدى 20 عاماً، بينما قدر مندلسون (1974) مجموع العدد بنحو 70.000 عامل موسمي وربما 10.000 من البنائين الدائمين. لكن كلتا الروايتين فيهما مبالغات لا يمكن إثباتها.

هل يُعقل أن يكون هذا وصفاً لبناء الهرم فعلاً؟ هذا ما يراه مؤيدو نظرية الرفع، حيث قدم هؤلاء العديد من الحلول التي تبين كيفية إنجاز هذا العمل بمعونة روافع أو آلات بسيطة وذكية في آن معاً. فقد أيد هوجز Hodges ا(1989) الطريقة البسيطة التي تقوم على رفع الأحجار باستعمال روافع خشبية ومن ثم المداحل لوضعها في مكانها. أما الاعتراضات على هذا الرأي فتقوم قبل كل شيء على العدد الهائل من عمليات النقل العمودي المطلوبة لكل حجر موضوع في صفوف أعلى وعلى الحاجة إلى اليقظة والدقة المستمرة لمنع حوادث السقوط في أثناء التعامل مع أحجار زنة كل منها 2 - 2.5 طن.

وبصرف النظر عن التفاصيل، فإن المبادئ الأولى تتيح لنا حساب إجمالي الطاقة اللازمة لبناء الهرم الأكبر ومن ثم تقدير حجم العمل: فحساباتي (التي تخطئ في الزيادة بدلاً من افتراض الحدود النظرية الدنيا) تبين أن العدد لا يتجاوز 10.000 عامل (المربع 4-18). ومن الجوانب الأكيدة في بناء الأهرام أن ضخامة الادعاءات فيما يخص حجم العمل المطلوب هي مبالغات ليس لها ما يبررها. فإطعام عدد ضخم من العمال، ومعظمهم يتركزون في هضبة الجيزة، ربما كان عاملاً مقيِّداً لا يقل في تأثيره عن نقل الأحجار ورفعها، بل ربما كان أبعد منها أثراً.

ومن الصروح القديمة الأخرى التي تطلبت التزامات عمل طويلة الأجل أبراج المعابد المدرجة في بلاد ما بين النهرين (الزقورة) التي بنيت بعد 2200 ق.م. والمعابد البوذية المعروفة باسم ستوبا (أو داغوبا) التي بنيت تكريماً لبوذا وتؤوي بداخلها التحف الأثرية (راناويرا Ranaweera ا2004). أما فوكنستاين Falkenstein ا(1939) فيرى أن بناء أنوزيغورات قرب ورقة في العراق احتاج إلى 1.500 عامل كانوا يعملون لمدة 10 ساعات في اليوم على مدى خمس سنوات أي ما يعادل من الطاقة الكامنة 1 تريليون جول تقريباً. كما قدر ليتش Leach ا(1959) أن معبد جيتافانارامايا Jetavanaramaya وهو أكبر المعابد البوذية (ارتفاعه 122م ومشيد من 93 مليون من أحجار الطوب المبنية بغير إتقان) احتاج نحو 600 عامل عملوا على مدى 100 يوم في السنة لمدة 50 عاماً أو ما يزيد على 1 تريليون جول من الطاقة المفيدة (انظر الشكل 4-23).

تعد أهرامات أمريكا الوسطى، لاسيما أهرامات تيوتيهواكان Teotihuacan (التي بنيت في القرن الثاني م) وتشولولا Cholula من الأبنية المهيبة أيضاً. كان هرم تيوتيهواكان أطول معبد للشمس قمته مسطحة في الأعلى بارتفاع 70 م بما فيها المعبد (انظر الشكل 4-23). لكن بناءه أسهل من بناء أبنية أهرامات الجيزة الحجرية الثلاثة. يتألف قلب الهرم من تراب وأنقاض وطوب من الطين، أما الواجهة الخارجية فهي وحدها التي تتكون من حجر منحوت، مطلي بالجص والكلس (بولدوين Baldwin ا1977). ومع ذلك فقد احتاج إكماله إلى جهد 10.000 عامل على مدى 20 عاماً.

وعلى النقيض من تقديراتنا حول بناء الأهرامات الضخمة، فإن الأسرار لا تحيط بطريقة بناء الصروح الكلاسيكية مثل البارثينون والبانثيون (كولتن Coulton ا1977؛ آدم Adam ا1994؛ ماردر Marder وجونز Jones ا2015). فكثيراً ما يذكر تصميم البانثيون الرائع على أنه مثال على العبقرية في استعمال الخرسانة، لكن الادعاء بأن البنائين الرومان هم أول من استعمل هذه المادة ليس ادعاء دقيقاً. فالخرسانة هي مزيج من الإسمنت، والملاط (رمل وحصى) والماء، والإسمنت يصنع بمعالجة مسحوق الكلس الناعم والغضار والأكاسيد المعدنية تحت حرارة عالية في فرن دوار مائل - ولم يُستعمل الإسمنت في الخرسانة الرومانية المستعملة في بناء البانثيون أو أي صرح آخر حتى العشرينيات من القرن التاسع عشر (المربع 4-19).

نعرف أن النجفات - العوارض فوق الأعمدة - الهائلة (مثل تلك الموجودة في البارثينون والتي تزن 10 أطنان تقريباً) ينبغي أن ترفع بوساطة الروافع (ويمكن أن تدحرج إلى موقعها داخل أطر دائرية) وقد استعملت تصميمات مماثلة بعد ذلك بألفي عام في بناء الكاتدرائيات، وهي أعلى مباني القرون الوسطى في أوروبا تعقيداً. وتطلب بناؤها عدداً كبيراً من البنائين والحرفيين ناهيك عن استعمال الكثير من الأدوات الخاصة (ويلسون 1990؛ إرلاند- براندنبيرغ 1994؛ ريخت 2008؛ سكوت 2011). وبالرغم من أن الكثير من العمل كان موسمياً، لكن الحاجة كانت تستدعي تشغيل مئات من العمال بنظام كامل بمن فيهم قاطعو الأشجار، وعمال المقالع الحجرية،

المربع 4-19

بانثيون روما

كانت الخرسانة الرومانية مزيجاً من الركام (الرمل، والحصى، والأحجار، وغالباً حطام طوب أوالبلاط) والماء، لكن عامل التماسك فيها لم يكن الإسمنت (كما في الخرسانة) بل سبيكة كلسية (آدم 1994). كانت السبيكة تجهز في موقع البناء، والسبيكة الفريدة من الكلس المطفأ والرمل البركاني - الذي يجمع من بوتيولي (حالياً بوتزولي Pozzuoli التي تبعد بضعة كيلومترات غربي بركان فيزوف) وتعرف باسم بلفيري بوتيولانو (عرفت فيما بعد باسم بوتزولانا) - تصنع مادة قاسية تتصلب حتى تحت الماء. صحيح أنها لا ترقى إلى جودة الخرسانة الحديثة، لكن

السبيكة البوتزولانية والكلس الجيد صنعا مادة كانت من القساوة بحيث لم تكن تصلح لصنع جدران سميكة ومقاومة وحسب، بل قناطر وقباب ضخمة أيضاً (لانكاستر 2005).

وقد بلغ استعمال الرومان لما يسمى الخرسانة الرومانية ذروته في البانثيون الذي اكتمل بناؤه عام 126 م في عهد هادريان. والقبة الضخمة التي يبلغ قطرها 43.3 م (القسم الداخلي من البناء هو بحجم كرة بذات القطر) لم يتفوق عليها أي بناء في العصر ما قبل الصناعي، مع أن قبة القديس بطرس التي وضع تصميمها مايكل أنجلو واكتملت عام 1590 اقتربت من البانثيون حيث بلغ قطرها 41.75 م (لوتشيني Lucchini ا1966؛ ماردر وجونز 2015). وبالرغم من جمال مظهرها، إلا أن أجود خصائصها هو تناقص كتلتها النوعية تناقصاً عمودياً: فالصفوف الخمسة من السقف ذي التجاويف المربعة لايتناقص حجمها وهي تتقارب نحو العين المركزية وحسب، بل هي مبنية من طبقات من مواد يتناقص سمكها وتستخدم خلائط خفيفة مصنوعة من أحجار كلسية في القعر لتنتهي بالأحجار البركانية المسامية الخفيفة في الأعلى (ماك دونالد 1976). أما زنة القبة بأكملها فهي نحو 4.500 طن.

وسائقو العربات، والنجارون، والبناؤون، وعمال الزجاج - الذين كانوا يعملون لعقد أو عقدين من الزمن. لذا كان إجمالي استثمار الطاقة أصغر بقيمتين أسِّيَتَيْن من بناء الأهرامات، حيث كانت ذروة العمل تبلغ بضع مئات الكيلو واط وحسب.

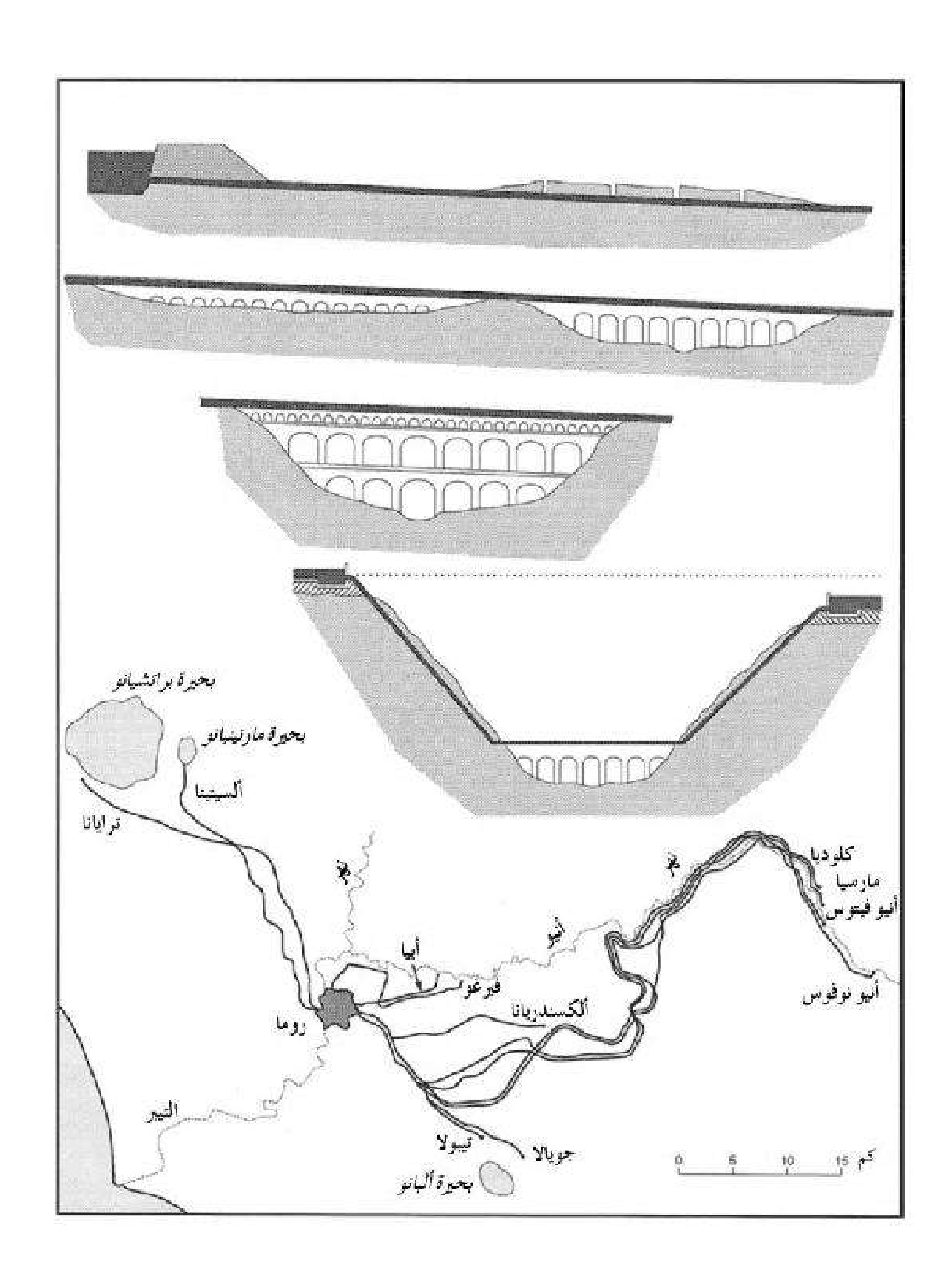
صحيح أن بناء بعض الكاتدرائيات اكتمل بسرعة (شارتر استغرق بناؤها 27 سنة، واستغرق بناء نوتردام الأصلية في باريس نحو 37 سنة) إلا أن عملية البناء كانت كثيراً ما تقطع بسبب الأوبئة، والنزاعات العمالية، وتغير أنظمة الحكم، والصراعات الداخلية والدولية. ونتيجة لذلك، كان بناء الكاتدرائية يستغرق أجيالاً عدة، وأحياناً قروناً من الزمن حتى يكتمل. فكاتدرائية سان فيتوس في براغ التي بدأها شارل الرابع عام 1344 تم التخلي عنها في مطلع القرن الخامس عشر، ولم يكتمل البناء الناقص (والذي كان مغلقاً بالجدران) إلا في عام 1929 (بإنشاء برجين مدببين من الطراز القوطي (كوثان Kuthan ورويت Royt ا2011).

إن المشروعات المائية الكبيرة مثل السدود والقنوات والجسور موثقة توثيقاً جيداً من القدس وبلاد ما بين النهرين واليونان. لكن المنجزات الرومانية هي بالتأكيد أشهر الأمثلة عن الحلول الهندسية البارزة لتزويد المدن بالماء. فالماء كان يجر إلى كل مدينة رومانية كبيرة وفق خطة بارعة. ولم يكن هناك ما يفوق هذا الإنجاز إلا حين دخلت أوروبا عصر التصنيع. كانت القنوات الرومانية محل إعجاب شديد (الشكل 4-24)، وقد دعاها بليني في كتابه التاريخ الطبيعي Historia Naturalis «أكبر إنجاز في العالم قاطبة».

بدءاً بالقناة المائية أكوا أبيا Aqua Appia عام 312 ق.م. شمل نظام جر المياه 11 خطاً بلغ طولها الإجمالي 500 كم (أشبي Ashby ا1935؛ هوج Hodge ا2001). ومع نهاية القرن

الأول الميلادي كان إجمالي التغذية المائية اليومية قد تجاوز 1 مليون م^3 (1جيغا ليتر/يوم) أي بمعدل وسطي قدره 1.500 ل/فرد. في حين أن روما مع نهاية القرن العشرين (بعدد سكان بلغ 3.5 مليون نسمة) صار معدل جر المياه (بما في ذلك الاستعمالات الصناعية) نحو 500 ل/للفرد (بونوBono وبوني Boni ا1996). كذلك كان نظام قنوات الصرف الصحي التي تسري تحت الأرض في روما يستحق الإعجاب حيث كان قطر قناطر كلوكا ماكسما cloaca maxima نحو 5 م.

وفي طول الإمبراطورية الرومانية وعرضها، تشكلت القنوات المائية من عدد



بحيرة براتشيانو
بحيرة مارتينيانو
ألسيتنا
ترايانا
كلوديا
مارسيا
أنيو فيتوس
أبيا
أنيو
فرغو
ألكسندريانا
أنيو نوفوس
روما
التيبر
تيبولا
جوليا
بحيرة ألبانو
0 5 10 15 كم

الشكل 4-24

كانت القنوات الرومانية تحمل الماء من الأنهار أو الينابيع أو البحيرات أو الخزانات من خلال الجمع بين اثنين أو ثلاثة على الأقل من البنى التالية (من الأعلى): قنوات ضحلة مستطيلة الشكل تجري على أساس، أنفاق يمكن الوصول إليها من خلال حفر أسطوانية طولية، أرصفة تغرز فيها القناطر، جسور مقنطرة مفردة أو مزدوجة، وسيفونات من أنابيب رصاص تحمل الماء عبر الوديان العميقة. وتعد القنوات الرومانية التي كانت تزود الرومان بما يقرب من مليون م3 من الماء يومياً نظاماً يستحق الإعجاب بني خلال أكثر من 500 عام. مقتبس من أشبي (1935) وسميث (1978). ميل القناة مبالغ فيه.

من العناصر الإنشائية المعروفة (الشكل 4-24). فبدءاً من الينابيع، أو البحيرات، أو الخزانات المائية الصنعية كان للقنوات المائية مقطع مستطيل الشكل، وكانت تبنى من قطع حجرية أو خرسانة مبطنة بالإسمنت الناعم. ويلاحظ أن القنوات ذات الميل الاعتيادي الذي لا يقل عن 1: 200 كانت تتبع المنحدرات لتجنب حفر الأنفاق ما أمكن ذلك. ولكن عند تعذر تلافي المجرى تحت الأرض كان من الممكن الوصول إلى النفق من الأعلى عن طريق الحُفر الطولية. ولم يلجأ الرومان إلى الجسور إلا إذا كانت الوديان طويلة لا يمكن الالتفاف حولها أو عميقة جداً لايمكن رصف ضفافها. ولم يحمل من القنوات الرومانية على قناطر أكثر من 65 كم (أحياناً قناطر مشتركة). فالجسور الأغسطية في غارد (بارتفاع يزيد على 50م) ومريدا وتاراغونا هي أجمل أمثلة عن هذا الفن. كانت القنوات والأنفاق والجسور تنظف وتصان باستمرار على اعتبار أنها كانت معرضة دوماً لعوامل الحت.

أما إذا تطلب عبور أحد الوديان جسراً ارتفاعه يزيد على 50-60 م، فقد كان المهندسون الرومان يختارون حل السيفون المقلوب، حيث كانت أنابيبه تصل بين خزان رئيس في أحد طرفي الوادي مع خزان أخفض قليلاً يتلقى الماء من الخزان العلوي في الطرف الآخر من الوادي (هوج 1985؛ شرام Schram ا2014). ومع ذلك كان عبور النهر في قعر الوادي يتطلب بناء جسر. ويلاحظ أن كلفة الطاقة الباهظة لهذه المباني تعكس بالدرجة الأولى كميات الرصاص الهائلة اللازمة لصنع أنابيب الضغط العالي - فقد كانت تتحمل 1.82 ميغا باسكال (أي 18 ضغطاً جوياً) - وكلفة نقل المعدن لمسافات بعيدة من مراكز صهره. فعلى سبيل المثال، بلغ إجمالي كمية الرصاص اللازمة لصنع تسعة سيفونات في تغذية ليون بالماء نحو 15.000 طن.

التعدين

تعرف بدايات كل الثقافات العليا القديمة باستعمال المعادن الملونة (غير الحديدية). فبالإضافة إلى النحاس، عرف خبراء المعادن الأقدمون القصدير (الذي كان يمزج بالنحاس لصنع البرونز) والحديد، والرصاص، والزئبق، والمعدنين الثمينين: الفضة والذهب. فالزئبق معدن سائل في درجات الحرارة العادية، في حين أن ندرة الذهب النسبية وليونته منعت استخدامه فيما خلا سك العملة وأدوات الزينة. أما الفضة، فبالرغم من توافرها، إلا أنها لم تكن بالوفرة التي تسمح باستعمالها في صنع الأدوات بالجملة. كذلك ليونة الرصاص والقصدير قصرت استعمالهما خارج الخلائط على صنع الأنابيب وعلب الطعام. أما النحاس والحديد فهما المعدنان المتوافران نسبياً بكثرة ولهما قوة وصلابة لاسيما في مقاومة السحب أو عند صهرهما معاً. فاجتماع صفتي الوفرة والمزايا الأخرى جعل منهما الخيار العملي الوحيد لإنتاج أدوات متينة بالجملة. وقد سيطر النحاس والبرونز على أول ألفيتين من التاريخ المدون، في حين أن استعمال الحديد وسبائكه (أعداد هائلة من أنواع الفولاذ) سيطر اليوم أكثر من أي وقت مضى.

استعمل الفحم في صهر فلزات الحديد وغيره، بالإضافة إلى تنقيتها لاحقاً ووضع اللمسات النهائية على المعادن الخام والأجسام المعدنية وكانت العمالة البشرية الشاقة تستخرج المعادن وتسحقها، وتقطع الأشجار، وتصنع الفحم، وتبني الأفران وتشغلها، وتصب القوالب، وتصفي المنتوجات، وتعيد صب المعادن المرة تلو الأخرى. ظل التعدين يدوياً في كثير من المجتمعات الممتدة من الصحراء الأفريقية إلى اليابان إلى أن أدخلت الأساليب الصناعية الحديثة. ففي أوروبا ثم في أمريكا، حلت الحيوانات، ومن قبلها القوة المائية، محل المهمات المضنية التكرارية مثل تكسير الفلزات، وضخ الماء من المناجم، وصب المعادن. كان توافر الخشب، ثم سهولة الوصول إلى مصادر الطاقة المائية وإمكانية الاعتماد عليها في تشغيل أكيار[28] ومطارق أكبر كانت عوامل حاسمة في تقدم التعدين.

المعادن غير الحديدية

شكلت الأدوات والأسلحة الحديدية جسراً يربط بين العصر الحجري وعصر الحديد من التطور البشري. لكن استعمالات النحاس الأولى التي يعود تاريخها إلى الألفية السادسة ق.م. لم تكن تتضمن أي صهر. فقد كان تشكيل قطع المعدن النقي يتم بأدوات بسيطة أو بوساطة التسخين والطرق بالتبادل (كرادوك Craddock ا1995). ويعود تاريخ أول دليل على استغلال المعدن المحلي (في شكل خرزات من المالاكايت والنحاس في جنب تركيا) إلى سنة 7250 ق.م. (سكوت Scott ا2002). وقد شاع صهر المعدن وصبه بعد منتصف الألفية الرابعة ق.م. في عدد من الأقاليم مع الأكسيد الغني المتوافر نسبياً وفلزات الكربونات (فوربيز 1972). وقد تركت لنا مجتمعات بلاد ما بين النهرين (قبل 4000 ق.م.) ومصر ما قبل أسر الفراعنة (قبل 3200 ق.م.) وثقافة موهنجودارو في وادي السند (2500 ق.م.) وقدماء الصينيين (بعد 1500 ق.م.) العديد من الأدوات النحاسية - مثل الحلقات والأزاميل، والفؤوس، والسكاكين والرماح.

ومن أبرز ما ضمت مراكز استخراج النحاس القديمة شبه جزيرة سيناء المصرية، وشمال أفريقيا، وقبرص، وما يعرف اليوم بسوريا وإيران وأفغانستان ومنطقة القوقاز وآسيا الوسطى. أما إيطاليا والبرتغال وإسبانيا فأصبحت مناطق منتجة لاحقاً. ونظراً لارتفاع درجة انصهار المعدن (1083 º) فإن إنتاج النحاس النقي كان كثيف الطاقة إلى حد بعيد ويتم باستخدام الخشب أو الفحم في حفر مبطنة بالطين أولاً ثم في أفران طينية ذات مداخن بسيطة قليلة الارتفاع يجري فيها الهواء جرياناً طبيعياً. وقد حصلنا على أول دليل على استخدام الكير من مصر في القرن السادس عشر ق.م. لكن استخدامه بالتأكيد أقدم من ذلك التاريخ. كان المعدن الذي تخالطه الشوائب ينقى بتسخينه في بواتق صغيرة ثم يصب في قوالب حجرية أو طينية أو رملية. أما المنتجات المعدنية فكانت تصنع على شكل أشياء مفيدة أو أدوات للزينة بوساطة الطرق، أو الشحذ، أو الثقب والتلميع.

أما إنتاج المعدن من فلزات السلفيد الوفيرة فكان بحاجة إلى مهارات فنية أعلى بكثير (فوربيز 1972). فأولاً ينبغي أن تجرش وتشوى في أكوام أو أفران لعزل الكبريت والشوائب الأخرى (الأنتيمون والزرنيخ والحديد والرصاص والقصدير والزنك) التي تغير من خواص المعدن. وقد ظلت عملية جرش الفلزات تتم بالطرق اليدوي على مدى آلاف السنين، وهي ممارسة راجت في آسيا وأفريقيا حتى القرن العشرين. أما في أوروبا فقد حلت النواعير والخيل المربوطة إلى أحجار الطواحين تدريجياً محل

المربع 4-20

الاحتياجات من الحطب لصهر النحاس والفضة الرومانية في ريو تينتو

تبين من أول خريطة وضعت لأكوام الشوائب الهائلة في ريو تينتو أن هناك 15.3 ميغا طن من الشوائب من مناجم الرصاص والفضة و1 ميغا طن من الشوائب من مناجم النحاس. وقد حملت هذه التقديرات سلكيلد Salkield ا(1970) على الاستنتاج بأنه كان على الرومان قطع 600.000 شجرة مكتملة النمو سنوياً لتوفير الوقود لعمليات الصهر، وهذا مستحيل في جنوبي إسبانيا. وقد خلصت خريطة جديدة (قائمة على الحفر الموسع) بأن هناك 6 ميغا طن من الشوائب، ومع أن النحاس كان المنتج الرئيس في العصر الروماني، إلا أنه كانت هناك عمليات صهر واسعة للفضة (روذنبيرغ Rothenberg وبالوميروPalomero ا1986). وبنسبة 1:1 من الخبث إلى الفحم و5: 1 من الخشب إلى الفحم نرى أن إنتاج 6 ميغا طن من الشوائب يحتاج إلى 30 ميغا طن من الخشب أو 75.000 طن/سنة خلال 400 سنة من العمليات واسعة النطاق.

فتوفير هذا الوقود بقطع الغابات الطبيعية (بطاقة تخزين لا تتجاوز 100 طن/هكتار) يتطلب سنوياً إزالة مساحة 750 هكتاراً من الغابات، أي ما يعادل دائرة نصف قطرها نحو 1.5 كم: وهذا عمل ضخم لكنه ممكن ويؤدي إلى القضاء على الغابات بشكل واسع. وبالمثل فإن قروناً من

صهر النحاس في قبرص (بدءاً من 2600 ق.م.) خلف أكثر من 4 ميغا طن من الشوائب. ومن الواضح أن الصهر قديماً كان سبباً رئيساً في القضاء على الغابات في منطقة الشرق الأوسط ومنطقة القوقاز وأفغانستان كما أن قلة الأخشاب المحلية حدت من نسبة الصهر.

العمل اليدوي. وبالنسبة إلى شي الفلزات المجروشة فلم يكن يحتاج إلا إلى القليل من الوقود. أما صهر الفلزات المشوية فكان يتم في أفران ذات مهاوٍ طولية يتبعه صهر المعدن الخشن (لايحتوي على أكثر من 65-75% من النحاس) وإعادة صهره لإنتاج نحاس نقي تقريباً بنسبة (95-97%). ومن الممكن تنقية هذا المنتج لدرجة أكبر من خلال الأكسدة، ونزع الخبث، والتصعيد. وهذه السلسلة تزيد من الوقود اللازم إلى حد كبير.

إن حساب كمية الوقود المطلوبة سنوياً وتراكمياً لعمليات الصهر القديمة عملية غير مؤكدة ضمنياً، لأنها تقع تحت تأثير تقديرات كمية الخبث والافتراضات المتعلقة بطول الاستخلاص وكثافة الطاقة الخاصة بالصهر. كل هذه العناصر غير المؤكدة مبينة تماماً في أضخم تركيز للصهر في العالم ألا وهو ريو تينتو في جنوب غرب إسبانيا على بعد أقل من 100 كم غربي إشبيليا (المربع 4-20). على أي حال ظل معدل الصهر الروماني في الصدارة لمدة 1.500 سنة أخرى. وتصف ملخصات الخبرة المعدنية في أواخر العصور الوسطى (أغريكولا Agricola، 1912 [1556]؛ بيرينغوتشيو Biringuccio، 1959 [1540]) عملية صهر النحاس بطرائق لا تختلف كثيراً عما يحدث في ريو تينتو.

ومنذ بدايات صهر النحاس دخل بعض المعدن في صنع البرونز، وهي أول سبيكة اختارها كريستيان طومسون Christian Thomsen لتقسيمه التطورَ الإنساني الذي أضحى الآن تقسيماً كلاسيكياً يبدأ بالعصر الحجري، ثم البرونزي فالحديدي (طومسون 1836). هذا التقسيم مغرق في عموميته. فبعض المجتمعات، وأبرزها مصر قبل 2000 ق.م. لم تمر إلا بالعصر النحاسي وحسب، في حين أن مجتمعات أخرى، وبالأخص في الصحراء الأفريقية، انتقلت مباشرة من العصر الحجري إلى العصر الحديدي. فقد ظهرت الأدوات البرونزية من صهر فلزات النحاس المحتوية على القصدير بمحض الصدفة. وقد أنتجت فيما بعد بصهر فلزات المعدنين معاً، ولم تصنع سبيكة من المعدنين معاً إلا بعد 1500 ق.م. ولما كانت درجة انصهار القصدير

المربع 4-21

قوة سحب المعادن والسبائك المألوفة وصلابتها

المعدن أو السبيكة	قوة السحب (ميغا باسكال)	الصلابة (مقياس برنتل)
النحاس		
المقوى	220	40
المسحوب على البارد	300	90
البرونز (90% نحاس، 10% قصدير)	840	240
النحاس الأصفر (70% نحاس، 30% زنك)	520	150
الحديد الصب	130-310	190-270
الفولاذ	650 - 2.000	280 - 500

المصدر: بناء على أوبرغ Oberg وفريقه (2012)

لا تزيد على 231.97 ^{o} فقد كان المعدن ينتج من فلزات أكسيده بكمية قليلة من الفحم. ومع أن البرونز سبيكة ذات خصائص أعلى لكن إجمالي كلفة طاقته أقل من كلفة النحاس النقي.

ومع تغير نسبة القصدير بين 5% و30% (وبالتالي فإن نقطة الانصهار تراوحت بين 750 ^{o} مئوية و900 ^{o} مئوية) فقد كان من المستحيل الحديث عن برونز معياري. فالسبيكة المفضلة لصب المدافع التي تتألف من 90% من النحاس و10% من القصدير تتمتع بمقاومة شد عالية وقساوة أكثر من أفضل أنواع النحاس المسحوب على البارد بنسبة 2.7 (أوبرغ وآخرون Oberg

et al. ا2012؛ المربع 4-21). وهكذا جلب توافر البرونز أول الفؤوس المعدنية الجيدة، والأزاميل، والسكاكين، والبيليا المعدنية بالإضافة إلى السيوف التي يعتمد عليها في القطع والطعن.

وفي المعتاد يشكل القصدير 25% من سبيكة أجراس البرونز، لكن سبيكة النحاس والزنك كانت السبيكة الأخرى المهمة تاريخياً التي تجمع هذين العنصرين (ا<50% حتى نحو 85% من الإجمالي). وكما هي الحال في البرونز، فإن إنتاجه يحتاج من الطاقة أقل ما يحتاجه صهر النحاس النقي (نقطة انصهار الزنك هي 419 ^{o} مئوية). فزيادة نسبة الزنك تحسن مقاومة سحب السبيكة وقساوتها. فبالنسبة إلى سبيكة النحاس الأصفر فهي أعلى بـ 1.7 ضعفاً من النحاس المسحوب على البارد، لكن من دون أن يكون هناك تخفيض في قابلية السبيكة للسحب والطرق ومقاومتها للتآكل. ويعود تاريخ أول استعمال لسبيكة النحاس والزنك إلى القرن الأول ق.م. ولم تستعمل السبيكة على نطاق واسع في أوروبا إلا في القرن الحادي عشر، وشاع استخدامها بعد عام 1500.

حل الحديد محل النحاس رويداً رويداً. صحيح أن أشياء حديدية كانت تنتج في بلاد ما بين النهرين في النصف الأول من الألفية الثالثة ق.م.، لكن أدوات الزينة والأسلحة الاحتفالية لم تنتشر إلا بعد 1900 ق.م.، ولم يبدأ استعمال الحديد على نطاق واسع إلا بعد 1400 ق.م. وكثر وجود المعدن بالفعل بعد عام 1000 ق.م. أما عصر الحديد في مصر فيعود تاريخه إلى القرن السابع ق.م.، وفي الصين إلى القرن السادس. وصنع الحديد في أفريقيا قديم أيضاً، مع أن المعدن لم يصهر إطلاقاً في أي مجتمع من مجتمعات العالم الجديد. ارتبط صهر الحديد بوفرة إنتاج الفحم. فالحديد ينصهر عند الدرجة 1535 o مئوية، ومع أن حرارة نار الفحم في حد ذاتها يمكن أن تصل إلى 900 o إلا أن نفث الهواء بقوة يرفع حرارتها إلى 2000 o مئوية تقريباً. وهكذا نرى أن الفحم هو الوقود الذي أحرق لصهر فلزات الحديد في كل مجتمع تقليدي عدا الصين (حيث كان الفحم الحجري يستعمل أيضاً منذ عهد أسرة هان) لكن عمليات إنتاجه واستخدامه المعدني تحسنت بالتدريج.

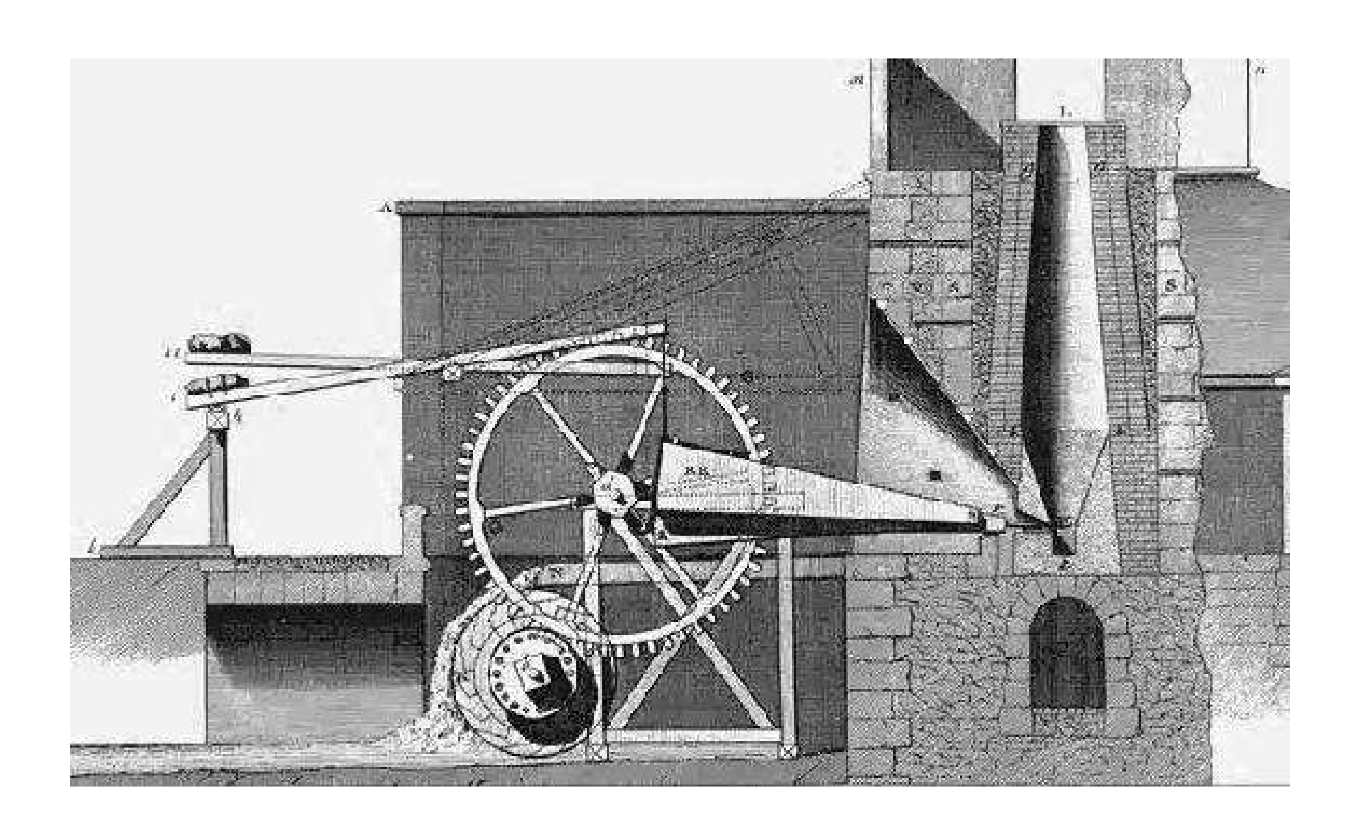
بدأ تطور صنع الحديد في أفران مغلقة هي الواقع حفر قليلة العمق مبطنة بالطين أو الحجر حيث كانت فلزات الحديد المجروشة تصهر بالفحم. كانت هذه الأفران البدائية تُنصب على رؤوس التلال للحصول على أقوى تيار للهواء. فيما بعد استعملت أنابيب ضيقة من الطين لنفث الهواء في الفرن، أولاً من كير جلدي يعمل يدوياً مثل المنفاخ ثم من كير أكبر يعمل بالضغط على دواسة بالقدم، أما في أوروبا فصارت الأكيار تدار بقوة الماء. وأقيمت جدران طينية بسيطة لاحتواء الصهر: كان ارتفاعها يتراوح بين بضعة سنتيمترات وأكثر من متر، لكنها وصلت في بعض أجزاء العالم القديم (بما فيها أفريقيا الوسطى) إلى أكثر من 2م (فان نوتن an Noten وريميكرس Raymaekers ا1988).

عثر علماء الآثار على آلاف من هذه البنى المؤقتة المنتشرة عبر العالم القديم من شبه جزيرة آيبيريا إلى كوريا، ومن شمال أوروبا إلى أفريقيا الوسطى (هالاند Haaland وشيني Shinnie ا1985؛ أولسن Olsson ا2007؛ جولف Juleff ا2009؛ بارك Park وروزن Rehren ا2011؛ ساسادا Sasada وتشونغ Chunag ا2014). لم تكن درجة الحرارة داخل الأفران المسخنة بالفحم تتجاوز 1100-1200 o وهي درجة كافية لتخفيض أكسيد الحديد، لكنها من دون درجة انصهار الحديد بكثير (الحديد النقي يذوب في الدرجة 1535 o مئوية) أما إنتاجها النهائي فكان الحديد الزهر (كانت كتلته في العصور الوسطى 5-15 كغ، وفيما بعد 30-50 كغ أو حتى أكثر من 100 كغ) وهو كتلة اسفنجية من الحديد وسبيكة من الخبث الغني بالحديد مليئة بالشوائب غير المعدنية (بايلي Bayley، دنغورث Dungworth، وباينتر Paynter ا2001).

يحتوي الحديد الزهر على 0.3-0.6% من الكربون، وينبغي تسخينه مراراً لإنتاج كتلة من الحديد المطاوع القاسي القابل للسحب والطرق الذي يحتوي على أقل من 0.1% من الكربون. استعمل

الحديد المطاوع في صنع الأشياء والأدوات من المسامير إلى الفؤوس. وأخذ الطلب على الحديد الزهر يزداد في أوروبا في القرن الحادي عشر بسبب استعمال الدروع الحديدية وزيادة إنتاج الأسلحة اليدوية والخوذات بالإضافة إلى الأدوات المألوفة الأخرى من المناجل والمذاري إلى الحلقات وحدوات الخيل. واستعملت الأربطة المعدنية أيضاً في بناء الكاتدرائيات والقصر البابوي الجديد في أفنيون الذي بدأ بناؤه عام 1252 وتطلب 12 طناً من معدن البناء (كارون *Caron* ا2013).

كان الصينيون في عهد أسرة هان (207 ق.م. - 220م) أول الحرفيين الذين أنتجوا الحديد السائل، وأفرانهم المبنية من أنواع من الطين المنعكس والمدعمة غالباً بكابلات الكرمة أو الخشب الثقيل تجاوزت أخيراً 5 م. وكان بوسعها استيعاب شحنة وزنها 1 طن من فلز الحديد وإنتاج حديد صب على دفعتين في اليوم. كانت النسبة العالية من الفوسفور التي خفضت نقطة انصهار الحديد واختراع الأكيار المزدوجة التي وفرت نفثاً قوياً للهواء بمثابة مكونات حيوية لهذا النجاح المبكر (نيدام 1964). بعدئذ جاء استعمال الفحم المرصوص حول بطاريات البواتق الأنبوبية التي تحوي الفلزات وتعمل بأكيار أضخم تدار بالماء. أما الصب في قوالب قابلة للتبادل فقد استعمل لإنتاج المعدات الحديدية بالجملة، بالإضافة إلى أوعية الطبخ والقدور رقيقة الجدران، والتماثيل قبل نهاية حكم أسرة هان (هوا Hua ا1983). لم تكن هناك تحسينات لاحقة مهمة إلا فيما ندر، ولم تبدأ أفران الصهر الصغيرة في الصين سلسلة المباني الضخمة اليوم.



الشكل 4-25

فرن عالٍ يعمل بحرق فحم الخشب يعود إلى منتصف القرن الثامن عشر وله أكيار تعمل بعجلة مائية تعمل بالتغذية العلوية. مقتبسة من الموسوعة *Encyclopédie* ديدرو وألمبيرت (*Diderot and d'Alembert*ا 1769-1772).

نشأت هذه المباني خلال التطور البطيء للأفران العالية الأوروبية من المصهر الكاتالوني البسيط إلى أفران أوزمند المبطنة بالصخور في اسكندينافيا إلى ستوكوفن Stuckofen في ستيريا. فالمداخن العالية والأشكال الأفضل خفضت استهلاك الوقود. كما نتج الحديد السائل من الحرارة العالية والتماس بين الفلز والوقود لمدة أطول. وأغلب الظن أن الأفران العالية الأوروبية نشأت في وادي الراين الأسفل قُبيل عام 1400. وتنتج الأفران العالية الحديد الصب أو سبيكة تحتوي على 1.5-5% من الكربون الذي لا يمكن صبه أو لفه مباشرة. أما قوة تحمله للضغط فليست أعلى من النحاس (ويمكن أن تكون 55% أضعف). لكنه أقسى بنسبة الضعفين أو ثلاثة أضعاف (أوبرغ وآخرون 2012؛ المربع 4-21).

ازداد عدد الأفران العالية باطراد في القرنين السادس عشر والسابع عشر. ولعل أبرز التحسينات آنذاك كانت إدخال الأكيار الجلدية الضخمة. كانت أجزاؤها العلوية والسفلية تصنع من الخشب أما الجانبان فمن جلد الثور. بعد عام 1620 ظهر الكير المزدوج الذي يعمل بالتناوب بكامات على محور ناعورة الماء واستطالة متدرجة للمدخنة. لكن هذين الاعتبارين اصطدما بالعوائق التي فرضتها الاستطاعة القصوى للنواعير المائية والخصائص الفيزيائية للفحم. في عام 1750 كانت أكبر النواعير تنتج 7 ك واط من القوة المفيدة. لكن خلال حملات الصهر الصيفية لم يكن هناك من الماء ما يكفي لتوليد الطاقة القصوى. فأكبر مشكلات الفحم هي شدة قابليته للتفتت: إنه يتفتت تحت الأحمال الثقيلة، واستخدامه وضع حداً لكتلة الفلز والحجر الكلسي المستعملة وبالتالي من ارتفاع مداخن الأفران العالية بحيث لم يتجاوز 8 أمتار (سميل 2016؛ الشكل 4-25). وقبل عام 1800 تم التخلص من هاتين المعضلتين الأولى بفضل محرك واط البخاري والثانية بفضل استخدام فحم الكوك.

في العصور الوسطى كانت أفران الحديد الزهر تحتاج إلى 3.6-8.8 ضعفاً أكثر ما تحتاجه كتلة الفلز المطلوب تسخينه (يوهانسن Johannsen ا1953). وحتى عند استعمال فلزات تحتوي على 60% من الحديد تحتاج الأفران إلى 8 على الأقل وإلى 20 كغ من

المربع 4-22

احتياجات فرن عالٍ إنجليزي من الوقود في القرن الثامن عشر

كانت الأفران العالية الإنجليزية في مطلع القرن الثامن عشر تعمل من أكتوبر حتى مايو فقط، وخلال ذلك الوقت كان معدل إنتاجها لا يزيد على 300 طن من الحديد الصب (هايد Hyde ا1977). والافتراضات المتواضعة التي تقول إن 8 كغ من الفحم للكيلوغرام الواحد من الحديد و5 كغ من الخشب لكل كغ من الفحم تترجم إلى متطلبات سنوية قدرها 12.000 طن من الخشب لفرن صهر واحد. بعد عام 1700، اختفى كل النمو الطبيعي للغابات التي يمكن الوصول إليها، وكان الخشب يقطع في دورات من 10-20 سنة من الأراضي التي تزرع بالغابات التي تكون فيها الزيادة السنوية بين 5 و10 أطنان/هكتار. فإنتاجية متوسطة قدرها 7.5 طن/ هكتار تتطلب نحو 1.600 هكتار من غابات الأخشاب المزروعة للاستمرار في العمل. وللمقارنة نورد أن فرناً عالياً ضخماً وأقل كفاءة في القرن السابع عشر في غابة دين احتاج إلى 5.300 هكتار من نمو أراضي الغابات المزروعة في حين أن أعمال الحديد في ويلدن Wealden احتاجت إلى 2.000 هكتار لكل مجموعة فرن - صب (كروسلي Crossley ا1990).

الفحم الخشبي للكيلوغرام الواحد من المعدن الساخن. وفي نهاية القرن الثامن عشر كانت معدلات الفحم/معدن المألوفة نحو 8: 1؛ ثم هبطت إلى نحو 1.2 في 1900 وإلى 0.77 في أفران الفحم السويدية (كامبل Campbell ا1907؛ غرينوود Greenwood ا1907). وهكذا نجد أن فرناً جيداً في أواخر القرن التاسع عشر يعمل بحرق فحم الخشب لم يحتج إلا إلى عُشر الطاقة التي كان يحتاجها قرينه في العصور الوسطى. لذلك فإن متطلبات الطاقة العالية للصهر بحرق فحم الخشب قبل عام 1800 تسببت من دون شك في القضاء على جزء كبير من الغابات المجاورة لمواقع الأفران العالية. فالفرن الأنموذجي الإنجليزي من أفران أوائل القرن الثامن عشر كان بحاجة إلى 1.600 هكتار من الأشجار للحفاظ على استمرار مده بالوقود (المربع 4-22).

المربع 4-23

احتياجات الطاقة اللازمة لإنتاج الحديد في بريطانيا وأمريكا

في عام 1720 أنتج 60 فرناً بريطانياً عالياً نحو 17.000 طن من الحديد الصب، وتطلب إنتاج هذه الكمية إحراق 40 كغ من الخشب لكل كغ من المعدن أي نحو 680.000 طن من الخشب. إن صب المعدن لصنع 12.000 طن من القضبان أضاف، 2.5 كغ من الفحم لكل كغ من القضبان، و150.000 طن أخرى للاستهلاك السنوي لـ 830.000 طن من خشب التفحيم. ومع معدل إنتاجية قدره 7.5 طن/هكتار فإن هذا يتطلب إزالة نحو 1.100 كم^2 من الغابات ونمو الغابات المزروعة واستمرار قطعها.

في الولايات المتحدة كانت أول حصيلة من الحديد الصب لعام 1810 عندما احتاج إنتاج 49.000 طن تقريباً من المعدن إلى 1 ميغا طن من الخشب (على افتراض أن 5 كغ من الفحم،

أو على الأقل 20 كغ من الخشب لكل كغ من المعدن الساخن). في ذلك الوقت كان كل ذلك الخشب يأتي من قطع أشجار الغابات الطبيعية القديمة، النظام البيئي الغني الذي اختزن نحو 250 طناً/هكتار (براون، شرويدر Schroeder، وبيردزي Birdsey ا1997) ولو أن كل الغطاء النباتي فوق الأرض استعمل في صنع الفحم، لوجب قطع الغابات في مساحة قدرها 4.000 هكتار (مربع طول ضلعه 6.3 كم) كل سنة للحفاظ على مستوى الإنتاج ذاك. كان باستطاعة الغابات الأمريكية الغنية دعم معدل أعلى. وفي عام 1840 كان كل حديد الولايات المتحدة يصهر بالفحم، لكنه بعد أن فعّل الانتقال السريع إلى فحم الكوك نحو 90% من إنتاج الحديد في عام 1880 وإثر الزيادات المتوقعة مستقبلاً في إنتاج الحديد لم يعد بالإمكان الاعتماد على الفحم: في عام 1910، حين بلغ إنتاج الحديد 25 ميغا طن، وحتى مع دفعات مخفضة بواقع 1.2 كغ من الفحم و5 كغ من الخشب للكيلوغرام من المعدن الساخن - كان من المنتظر أن تصل حاجة البلد إلى 125 ميغا طن من الخشب سنوياً.

حتى لو افتراضنا زيادة عالية قدرها 7 أطنان/ هكتار في الغابات ذات النمو الثانوي، فإن الإمداد المستدام من ذلك الخشب كان سيتطلب إزالة 180.000 كم^2 من الغابات سنوياً، وهي مساحة تعادل مساحة ولاية ميزوري (أو ثلث مساحة فرنسا)، ممثلة بمربع ضلعه يصل من فيلادلفيا إلى بوسطن أو من باريس إلى فرانكفورت. ومن الواضح أنه حتى أمريكا الغنية بالغابات لم تستطع تحمل تبعات استعمال الفحم في صهر فلزات حديدها.

ويمكن تقدير المتطلبات الوطنية من الخشب اللازم لصنع الحديد باستخدام الفحم تقديراً دقيقاً في إنجلترا في أوائل القرن الثامن عشر قبل بدء الصناعة صهر الحديد باستعمال فحم الكوك: فالإمداد المستدام كان سيتطلب جمع الخشب المزروع أو الطبيعي من نحو 1.100 كم^2 من الأحراش أو الغابات (المربع 4-22). بعدها بقرن من الزمن لم تجد الولايات المتحدة مشكلات في تفعيل صهر فلزات حديدها بفحم الخشب المستمد من غاباتها الطبيعية، لكن في بداية القرن العشرين لم يعد هذا ممكناً، ولم يتمكن شيء سوى الكوك من السماح للبلد بأن تصبح أكبر منتج للحديد الصب (المربع 4-23).

ليس من الغريب إذن أن تجد المجتمعات المحاطة بمعامل صهر الحديد التقليدية أنفسها في حال بائسة. ففي عام 1548 تساءل سكان سسكس المعذبون كم بلدة سوف تفنى إذا ما استمرت أفران الحديد بالعمل: لن يتبقى لديهم خشب لبناء المنازل ولا لطواحين الماء، والعجلات، والبراميل، والأرصفة لرسو السفن ومئات الاحتياجات الضرورية الأخرى - وطلبوا من الملك إغلاق كثير من هذه المنشآت (سترايكر Straker ا1969؛ انظر أيضاً سميل 2016). وهكذا لم يصعب على أحد أن يعرف مساوئ صهر الحديد التقليدي. فحين يعري فرن صهر واحد دائرة في الغابة نصف قطرها نحو 4 كم من الأشجار، يسهل إدراك الأثر التراكمي لعشرات الأفران على مدى عشرات السنين.

تركز هذا التأثير بالضرورة في المناطق الجبلية المكسوة بالغابات، حيث كان من الممكن الإبقاء على انتشار وسائط نقل الفحم التي تجرها الحيوانات في أدنى مستوياته (وهذا أحد القيود التي تفاقمت بسبب هشاشة الوقود)، وتمت تلبية الحاجة إلى تشغيل الأفران العالية وأكيار الصب من خلال تركيب النواعير المائية. كان القرب من الفلز على جانب من الأهمية أيضاً، لكن بما أن الدفعة من الفلزات لم تكن سوى جزء ضئيل من وزن الفحم فقد كان نقلها أسهل. كان القضاء على الغابات الثمن الذي أرغمت البيئة على دفعه لكي نصنع المسامير والفؤوس وحدوات الخيل والدروع والرماح والمدافع ومقذوفات المدافع، كما أفرز التوسع المبكر في صنع الحديد والكمية المحدودة من الخشب المحلي أزمة طاقة في بريطانيا في القرن السابع عشر، وزاد الطين بلة الطلب الكبير على الخشب بسبب ازدهار صناعة بناء السفن.

كان الحديد متوافراً بكثرة نسبياً في كثير من المجتمعات في العصر ما قبل الصناعي على عكس الفولاذ الذي لم يكن متاحاً إلا في مجالات بعينها. والفولاذ، مثله مثل الحديد الصب، ليس سوى سبيكة، لكنه لا يحتوي إلا على 0.15% و1.5% من الكربون وغالباً ما يحتوي أيضاً على كميات ضئيلة من المعادن الأخرى (خاصة النيكل والمنغنيز والكروم). والفولاذ أفضل من الحديد الصب ومن أي سبيكة نحاسية: وتتفوق أنواع الفولاذ الجيد من حيث قوة السحب على الحديد والنحاس (أوبرغ وآخرون Oberg et al ا2012؛ المربع 4-21). فقد كان باستطاعة بعض تقنيات الصهر القديمة إنتاج فولاذ جيد نسبياً، لكن بكميات صغيرة فقط. استعمل صانعو الفولاذ التقليديون في شرق أفريقيا أفران صهر من الطين والخبث قليلة الارتفاع (ا<2 م) مخروطية الشكل تعمل بحرق الفحم وتقام فوق حفرة من العشب المتفحم. وكان باستطاعة ثمانية من العمال ينفخون بكير من جلد الماعز متصل بأتون من الخزف تحقيق درجات حرارة تتجاوز 1800 درجة مئوية (شميت Schmit وأفري Avery ا1978). وبفضل هذه الطريقة، وهي فيما يبدو معروفة منذ القرون الأولى من الحقبة العامة، كان بالإمكان إنتاج كميات صغيرة من الفولاذ الجيد بمحتويات متوسطة من الكربون.

من أجل إنتاج الفولاذ سلكت المجتمعات ما قبل الصناعية إحدى طريقتين فعالتين: إما كربنة الحديد المطاوع، أو نزع الكربون من الحديد الصب. فأما الطريقة الأولى فكانت تعتمد على تسخين المعدن لمدة طويلة في الفحم ما يؤدي إلى توزيع الكربون توزيعاً متدرجاً نحو الداخل. ومن دون معالجة إضافية، كانت هذه الطريقة تنتج طبقة من الفولاذ القاسي تحيط بلب من الحديد الطري. كانت تلك مادة مثالية لصنع سكك المحاريث - أو الدروع الحربية. أما المعالجة المتكررة فكانت توزع الكربون الممتص بشكل متجانس تقريباً وتصلح لصنع سيوف ممتازة. ويذكر أن عملية نزع الكربون من الحديد الصب بوساطة الأكسجة راجت في الصين إبان حكم أسرة هان، ووفرت المعدن اللازم لصنع السلاسل أو الجسور المعلقة.

أدى انتشار الحديد والفولاذ إلى عدد من التغيرات الاجتماعية العميقة. فالمناشير والفؤوس والمطارق والمسامير الحديدية كلها سرّعت من بناء البيوت وحسنت جودتها. وبالمثل فإن توافر أدوات المطبخ الحديدية مثل الملاعق والسكاكين وغيرها سهل عملية الطبخ وإدارة المنزل. كما لعبت حدوات الخيل وسكك المحاريث دوراً بالغ الأهمية في تحسين تكثيف المحاصيل. أما على

الجانب المدمر فقد أحدث صنع الأسلحة الحديدية من دروع الزرد والخِوَذ والسيوف الثقيلة ومن ثم المدافع والكرات الحديدية والأسلحة النارية الأخرى ثورة في فنون الحرب. وقد زاد من سرعة هذه العمليات زيادة كبيرة إدخال صهر الحديد باستعمال فحم الكوك وظهور المحرك البخاري.

الحرب

لعبت الصراعات المسلحة دوراً تشكيلياً على مر العصور، فهي تتطلب تعبئة مصادر الطاقة (غالباً على مستوى غير عادي، سواء في تدريب الجنود المشاة المزودين بأسلحة بسيطة، أو من خلال إنتاج مواد شديدة الانفجار، أو توفير العتاد والإمدادات لحروب طويلة الأمد) التي كثيراً ما كانت تؤدي إلى نشر قوة تدميرية هائلة شديدة التركيز. أضف إلى ذلك أن إمدادات الطاقة الأساسية، سواء أكانت طعاماً أو وقوداً، الخاصة بالشعوب المعرضة إلى صراعات مسلحة لاتتأثر أثناء فترة الصراع وحسب (بسبب تأمين الطعام للجيوش الزاحفة، وتدمير المحاصيل، أو توقف النشاطات الاقتصادية بسبب تعبئة الشباب والضرر الذي يلحق بالمستوطنات والبنية التحتية) بل غالباً ما يمتد أثرها إلى سنوات بعد انتهائها.

خاض الناس صراعاتهم التاريخية كافة بالأسلحة، لكن الأسلحة ليست وسائط تحريك أولية في الحروب. فباستثناء حالتين فقط، كانت عضلات البشر والحيوان وسائط تحريك الحروب الأولية إلى أن اختُرِع البارود: الأولى استخدام المواد الحارقة، والثانية بالطبع استخدام الأشرعة التي تعتمد على قوة الرياح لتسريع المناورات البحرية وتسهيلها. أما الأسلحة الميكانيكية التقليدية - اليدوية (مثل الخناجر والسيوف والرماح) والمقذوفة (مثل الرماح والسهام والأجسام الثقيلة التي تقذف بالمجانيق) - فقد صممت لإيقاع أكبر قدر من الضرر المادي من خلال التحرير المفاجئ للطاقة الحركية. ولا شيء غير اختراع البارود قدّم واسطة تحريك أحدث وأقوى لأن باستطاعة التفاعل الكيميائي أن يقذف الأجسام إلى مسافة أبعد ويضاعف قدرتها التدميرية. صحيح أن هذا التاثير ظل على مدى قرون من الزمن مقصوراً على الأسلحة الفردية وتصاميمها البدائية (البنادق التي تلقم من الأمام)، إلا أن البارود اكتسب أهمية أكبر بوصفه القوة القاذفة لكرات المدافع.

الطاقات الحية

كل الحروب البرية التي وقعت قبل التاريخ وكل الصراعات التي نشبت في العصور القديمة وبدايات العصور الوسطى كانت تدار بقوة البشر وعضلات الحيوانات فقط لاغير. فقد كان المحاربون يشهرون خناجرهم وفؤوسهم وسيوفهم في القتال القريب وهم على الأقدام أو على صهوات الخيل. كما استعملوا الرماح والحراب والأقواس والنشاب بنوعيها البسيط والميكانيكي (ومنهم الصينيون واليونانيون في القرن الرابع ق.م.) في إطلاق سهام تقتل العدو المكشوف على بعد 100-200 م. وما يشهد على قدم حرب القوس والنشاب صورة من مصر القديمة لجندي راكع على ركبته اليسرى ويمسك بالقوس بيده اليمنى الممدودة، وعلى كتفه الأيسر كنانة الأسهم

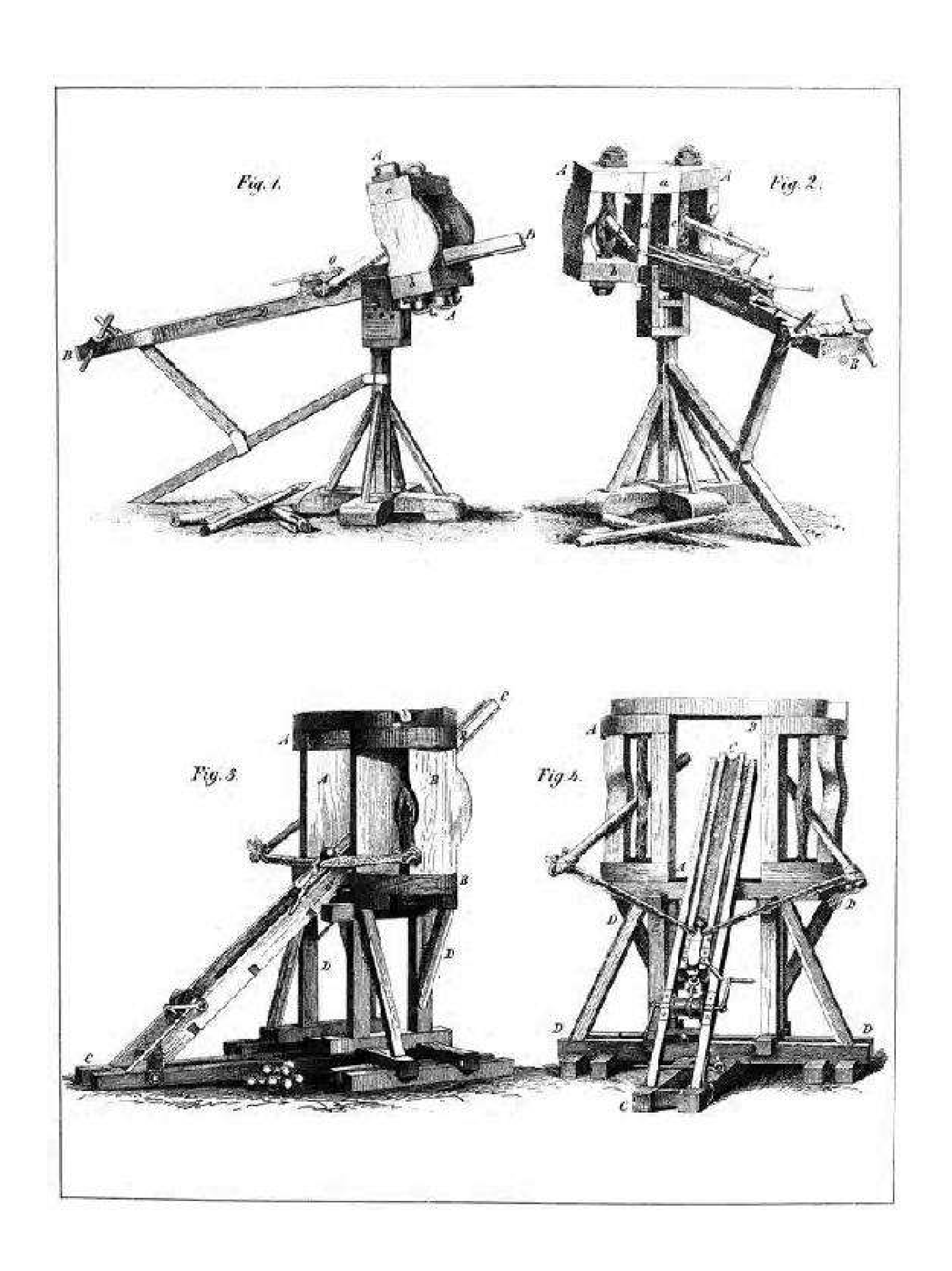
(بج Budge ا1920. كما استخدمت الطاقات الحية في لف حبال المنجنيقات الضخمة واستفادت من الجاذبية في قذف أثقال ضخمة بالمنجنيقات لاقتحام أسوار المدن وتدمير القلاع الحصينة.

المربع 4-24

الطاقة الحركية للسيوف والسهام

حتى السيوف الثقيلة في العصور الوسطى لم تزن أكثر من 2 كغ وعادة ما يكون وزنها أقل من 1.5 كغ. إن الطاقة الحركية تزداد مع مربع السرعة لكنها لا تزيد على 9 جول بالنسبة إلى سيف وزنه 2 كغ يمتشق بسرعة 3م/ثا، و75 جول بالنسبة إلى سيف كاتانا (السيف الياباني المنحني الرفيع أحادي الشفرة البالغ طوله 60-70 سم) يلوح به مقاتل خبير بسرعة 10م/ثا. ويبدو أن هذا قليل، لكن تأثير جرح السيف كبير إذا كان يستهدف جزءاً ضيقاً من الجسم (العنق أو الكتف أو الذراع) بينما تنفذ الطعنة عميقاً في أنسجة الجسم الرخوة. ويمكن لسهم لا يزيد وزنه على 20 غ إذا ما أطلقه رامٍ ماهر من قوس مركبة أن ينطلق بسرعة تصل إلى 40 م/ثا (بوب Pope ا1923) ويحرر طاقة حركية قدرها 16 جولاً. ومرة أخرى قد يبدو هذا قليلاً، لكن الهدف من السهم المنطلق أن يحدث ثقباً صغيراً فيخترق الجسم بعمق. وباستطاعة سهم برأس من صوان أو معدن أن يخترق درعاً من الزرد إذا ما أطلق من مسافة 40-50 م، ومع دقة التصويب يمكن للسهم أن يقتل رجلاً بلا درع من مسافة 200 م.

ألحقت الأسلحة اليدوية إصابات بالغة في العدو لأن الجروح والطعنات في الأماكن الحساسة يمكن أن تكون قاتلة على الفور، لكنها تتطلب الالتحام بين القوى المتحاربة، كما أنها تستمد قوتها من قوة عضلات المحارب. أما القوس والنشاب فأتاح الفصل بين القوى المتحاربة. وقد تمكن الرماة من إتقان دقة التصويب من مسافات بعيدة نسبياً تستحق الإعجاب. لكن معارك القوس والنشاب كانت تهدر الكثير من السهام بسبب سوء التسديد وضعف الطاقة الحركية للأسهم الخفيفة (المربع 4-24)، كما أن الزمن الفاصل بين إعادة تذخير السهام تباعاً وإطلاقها حد من فعالية الإصابات التي يمكن أن تلحقها هذه الأسلحة بالعدو. يضاف إلى ذلك أن قدرة الأداء البشري حددت مدى تقدم الجيوش في اليوم الواحد، وحتى لو استطاع الجنود الذين نالوا قسطاً كبيراً من الراحة وكميات وافرة من الطعام التحرك بسرعة،


Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Fig. 4.

الشكل 4-26

المنجنيقات الرومانية (Corbis)

فإن تقدم الجيش غالباً ما يرتبط بسرعة القوافل التي تنقل المؤن والتي تضم حيوانات بطيئة الحركة.

اعتمدت أشد الأسلحة فتكاً في العصور القديمة وبدايات العصور الوسطى على الخاصة الميكانيكية للروافع. فقد كانت الأقواس الميكانيكية الضخمة تستمد فعاليتها من التحرير المفاجئ لمزيج من الحبال أو الأوتار المرنة المجدولة (الشكل 4-26) التي دخلت الخدمة منذ القرن الرابع ق.م. (سودل Soedel وفولي Foley ا1979؛ كومو Cuomo ا2004) واستطاعت إطلاق السهام أو الأجسام؛ أما آلات المنجنيق المستعملة في حصار المدن فكانت روافع من الدرجة الثالثة: قاعدتها نقطة الارتكاز، وهي قوة توافرها حزم الشد حيث يقذف الحمل بسعة لا تتحقق باستخدام عضلات الإنسان استخداماً مباشراً. لكن المنجنيقات في العصور الوسطى التي كانت تقذف أحجاراً زنة كل منها 15-30 كغ لم تلحق أضراراً كبيرة بأسوار المدن.

في المقابل، كانت المنجنيقات التي اخترعها الصينيون قبل القرن الثالث ق.م. ممتازة، إذ كانت تدور حول محور، ويوضع المقذوف بنهاية ذراع القذف التي يبلغ طولها أربعة أو ستة أضعاف طول الذراع القصيرة (هانسن 1992؛ تشفدن Chevedden وآخرون 1995). اعتمدت المنجنيقات الأولية في عملها على أربعة رجال يشدون حبالاً مربوطة بالذراع القصيرة؛ ثم تطورت الآلات لاحقاً وصار لها ثقل مكافئ وصارت قادرة على رمي أجسام تزن مائة كيلوغرام (مع وجود أوزان قياسية تزيد على 1 طن) إلى مسافة أبعد من مدى مدفعية العصور الوسطى. استعملت المنجنيقات أيضاً في الدفاع أثناء الحصار حيث كانت تتمركز فوق الأبراج العالية من القلاع أو أسوار المدن وهي على أُهْبَة الاستعداد لقذف حجارة هائلة الحجم على أي هدف تطاله من القوات التي تحاصر المدينة.

في حروب العصر ما قبل الصناعي أدت الحيوانات دورين مميزين: فقد كانت عامل اختراق وواسطة نقل أتاحت نشر جيوش جرارة تحمل مؤونتها على ظهور حيوانات الجر أو الحمل. في الصور القديمة المسجلة كانت الخيل تربط بعربة خفيفة ذات عجلتين لهما عصي (استعملت للمرة الأولى عام 2000 ق.م.). وليس ثمة اختراع حربي تقليدي قبل البارود أثبت فعاليته لجمعه بين السرعة والتعديلات التكتيكية السريعة مثل الرماة على ظهور الخيل. فالرماة الخيالة الذين يرمون السهام وهم على صهوات خيلهم صغيرة الحجم (مثل الآشوريين أولاً ثم الفرس والمقدونيون واليونان) كانوا قوة خطيرة سريعة الحركة قبل استعمال الرِّكاب بقرون عدة (دروز Drews ا2004).

والركاب هو تلك القطع المعدنية الصغيرة التي تثبت أقدام الفرسان وهم على صهوة الخيل، وقد استعملت للمرة الأولى في الصين في بواكير القرن الثالث م، ثم انتشرت نحو الغرب فيما بعد. لقد منح الركاب الفارس دعماً وثباتاً لا نظير لهما على السرج (دين Dien ا2000). فمن دون الركاب لم يكن باستطاعة المحارب المتسربل بالدرع (سواء أكان الدرع كاملاً أم جزئياً أحياناً) أن يمتطي جواداً ضخم الحجم، وما كان بمقدوره أن يقاتل قتالاً فعالاً مستخدماً حَرْبة أو سيفاً ثقيلاً وهو على صهوة جواده. لكن هذا لا يعني أن الفرسان الذين تزود خيلهم بالركاب كانت لهم الغلبة في المعركة. فالفرسان الآسيويون غير المتسربلين بالدروع ويمتطون خيلاً صغيرة قوية البنية شكلوا وحدات قتالية فعالة إذ استطاعوا التحرك بسرعة بالغة وتمتعوا بقدرة كبيرة على المناورة.

هذا الجمع جلب فرسان المنغول من شرق آسيا إلى قلب أوروبا بين 1223 و1241 (سينور Sinor ا1999؛ آتوود Atwood ا2004؛ ماي May ا2013) ومكن العديد من إمبراطوريات السهول من العيش في أواسط آسيا حتى أوائل العصر الحديث (غروست Grousset ا1970؛ هيلدينغر Hildinger ا1997؛ أميتاي Amitai وبيران Biran ا2005؛ بيردو Perdue ا2005). وعبر سلسلة مدهشة من الغزوات البعيدة المدى جاءت الحملات الصليبية من كثير من البلدان الأوروبية إلى شرقي البحر الأبيض المتوسط حيث أسس الصليبيون (بين 1096 و1291) حكماً مؤقتاً في مناطق غير مستقرة في الداخل والساحل ما يعرف اليوم بفلسطين وأجزاء من الأردن وسوريا وتركيا (غروست Grousset؛ هولت Holt ا2014).

حافظت الخيل على أهميتها سواء أكانت في وحدات الفرسان أم مكدنة تحت نير العربات الثقيلة ومدفعية الميدان في سائر الصراعات الغربية الرئيسة سواء في باكورة العصر الحديث (1500-1800)، أو في الحروب النابليونية التي تركت بصمتها على العصر. كان على الجيوش الجرارة التي تقاتل بعيداً عن مواطنها الاعتماد على الحيوانات في نقل مؤنها: فحيوانات الحمل (وهي غالباً الحمير والبغال والخيل والإبل واللاما) كانت تستخدم في الأراضي الوعرة، بينما كانت حيوانات الجر (وهي غالباً الثيران والفيلة في آسيا) تجر العربات ومدفعية الميدان المتزايد ثقلُها باطراد. إن المتطلبات الهائلة للحملات العسكرية الضخمة التي تعتمد على قوة الجر تبدو لنا واضحة من خلال قائمة المؤن والحيوانات التي وافقت بروسيا المحتلة على تقديمها لجيوش نابليون لكي تغزو روسيا عام 1812 (المربع 4-25). فمن دون الثيران - وعددها 44.000 - التي تجر عربات المؤن، لما استطاع الجيش أن يتقدم.

في المعارك التي خاضتها الجيوش الأوروبية بعد 1840 استعملت أول واسطة تحريك أولية حديثة، ألا وهي المحرك البخاري، في تعبئة الجنود والحيوانات ونقلهم إلى جبهات القتال بالقطارات (أو نقلهم إلى موانئ الإبحار على متن السفن البخارية في حال إرسال الجند إلى الحروب الاستعمارية في القارات الأخرى)، لكن الحركة في ميادين القتال كانت تعتمد على عضلات البشر والحيوانات. ومع أن الحرب العالمية الأولى شهدت أول استخدام لوسائط التحريك الميكانيكية غير الحية (محركات الاحتراق الداخلي التي كانت تحرك الشاحنات والطائرات) في مناطق القتال أو بالقرب منها، ظلت الخيل ضرورة لا غنى عنها.

في أواخر عام 1917 اعتمدت الجيوش البريطانية في الجبهة الغربية على 386.000 حصان (خصص ثلثا هذا العدد لنقل العتاد والثلث لوحدات الفرسان) وبالرغم من أن التقدم الذي أحرزته القوات الألمانية في فرنسا (في ربيع عام 1950) وروسيا (عام 1941) والذي كثيراً ما يوصف بأنه درس أنموذجي عن حرب الدبابات السريعة الميكانيكية، فإن ألمانيا حشدت 625.000 حصان استعداداً لغزو روسيا، وبنهاية الحرب كان لدى القوات الألمانية نحو 1.25 مليون حيوان (إجرتون Edgertonا 2007). وبالمثل استخدم الجيش الروسي مئات الألوف من الخيل في تقدمه من



الشكل 4-27

الخيالة السوفييت في الساحة الحمراء في موسكو في 7 نوفمبر 1941، بعد أسبوع من بدء الغزو الألماني للوصول إلى موسكو (Corbis).

ستالينغراد وموسكو نحو برلين (الشكل 4-27). وهكذا ظل التبن والشوفان من المواد الاستراتيجية حتى نهاية الحرب العالمية الثانية.

المتفجرات والمدافع

كانت الأنواع الوحيدة من الطاقة غير الحية التي استخدمت في الحروب قبل اختراع البارود هي مواد حارقة تتألف من مزيج الكبريت والقار والنفط والكلس تثبت في رؤوس السهام أو تقذف على أهداف عبر الخنادق والأسوار من المنجنيقات. يعود أصل البارود من دون شك إلى الخبرة الطويلة لدى الكيميائيين وصناع التعدين الصينيين (نيدام وآخرون 1986؛ بوكانان Buchanan ا2006) فقد اشتغلوا بالمكونات الثلاثة - نترات البوتاسيوم والكبريت والفحم - مدة طويلة قبل البدء بمزجها معاً.

المربع 4-25

المؤن والحيوانات البروسية استعداداً للغزو الروسي

تمهيد الطريق أمام نابليون إلى روسيا: فيما يلي وصف لإسهام بروسيا أعده فيليب بول كومت دي سيغور Philip Paul comte de Ségur ا(1780-1873) وهو من أشهر جنرالات نابليون الشباب ومؤرخي الغزو الروسي الكارثي:

بموجب هذه المعاهدة وافقت بروسيا على تقديم مائتي ألف قنطار من الجاودار، وأربعة وعشرين ألفاً من الأرز، ومليوني زجاجة بيرة، وأربعمائة ألف قنطار من القمح، وستمائة وخمسين ألفاً من القش، وثلاثمائة وخمسين ألفاً من التبن، وستة ملايين كيس من الشوفان، وأربعة وأربعين ألف ثور، وخمسة عشر ألف حصان، وثلاثة آلاف وستمائة عربة مع أطقم النير وسائقيها كل منها محملة بألف وخمسمائة مثقال، وأخيراً مشافٍ مجهزة بمعدات تكفي عشرين ألف مريض. (سيغور 1825، 17).

ويعود تاريخ التركيبة الأولى للبارود إلى منتصف القرن التاسع؛ وقد نشرت التعليمات الواضحة حول إعداد البارود عام 1040 وكانت الخلطات الأولى تتألف فقط من 50% من الملح الصخري (نترات البوتاسيوم أو الصوديوم) ولم تكن متفجرة فعلاً إلى أن استقرت النسبة على 75% من الملح الصخري و15% من الفحم و10% من الكبريت.

وعلى النقيض من الاحتراق العادي حيث يتوجب الحصول على الأكسجين من الهواء المحيطي، فإن احتراق نترات البوتاسيوم KNO^3 يطلق الأكسجين الذاتي وبذلك يولد البارود سريعاً 3000 ضعف حجمه من الغازات. فإذا ما حصر وتم توجيهه في ماسورة المدفع استطاعت كمية صغيرة من البارود أن تنقل إلى كرة مقذوفة طاقة حركية أكبر ما يوفره المنجنيق الثقيل الذي كان يستخدم في إطلاق المقذوفات، كما أن الشحنات الأكبر تستطيع أن تقذف المقذوفات من مدفعية الميدان. وليس من الغريب أن تنتشر الأسلحة النارية والمدافع بعد اختراع البارود وتتطور بسرعة.

بدأ تطور المدفعية من الرماح النارية التي استعملها الصينيون في القرن العاشر. هذه الأنابيب التي كانت خيزرانية أولاً ثم صارت معدنية والتي تقذف الأشياء تطورت في البداية إلى مدافع برونزية بسيطة ترمي الحجارة السائبة رماية عشوائية. لكن أول المدافع الحقيقية صنعت في الصين بنهاية القرن الثالث عشر، ثم لحقت بها أوروبا بعد ذلك بعقود قليلة (وانغ Wang ا1991؛ نوريس Norris ا2003). وقد أدت ضغوط الصراعات المسلحة المتكررة إلى تسارع وتيرة الاختراعات وإلى إنتاج مدافع أقوى وأدق. وفي عام 1400 صنع مدفع بطول 3.6 م من عيار 35 سم كان الأطول من نوعه. أما مدفع مون ميغ Mon Meg الذي صنع في فرنسا عام 1499 وأهدي إلى اسكتلندا فكان طوله 4.06 م تقريباً، ويستطيع أن يقذف طلقة بوزن 175 كغ أما وزنه فبلغ 6.6 طن (غاير Gaier ا1967). وزادت القدرة التدميرية باستبدال المقذوفات الحديدية بالحجرية.

كانت التبعات الاستراتيجية للحروب المعتمدة على البارود هائلة سواء في البر أو البحر. فلم تعد هناك حاجة لضرب حصار طويل لاجدوى منه حول قلاع تبدو أنها منيعة لايمكن اقتحامها. فاجتماع دقة تصويب المدافع مع الكرات الحديدية الأثقل من سابقاتها الحجرية جعلت أي نظام دفاعي ينهار أمامها. لقد وضعت قدرة المهاجمين على تدمير الأبنية الحجرية القوية من مسافة أبعد من مدى رماة القوس والنشاب نهاية لقيمة الدفاع في الحصون التقليدية والمدن المسورة، كما حلت محل القلاع المحصنة على الطريقة المتبعة في القرون الوسطى بأسوارها الحجرية السميكة تصاميمُ جديدة تعتمد على مضلعات نجمية منخفضة الانتشار لها سواتر ترابية وخنادق مائية هائلة.

استهلكت هذه المشروعات كميات هائلة من المواد والطاقة. فتحصينات لونغوي Longwy في شمال فرنسا، وهي أضخم مشروع نفذه المهندس الحربي الفرنسي الشهير سيباستيان فوبان Sebastien Vauban ا(1633-1707) تطلبت نقل 640.000 م^3 من الصخور والتراب (وهو حجم يساوي ربع حجم هرم خوفو) ووضع 120.000 م3 من مواد البناء (م. س. أندرسون Anderson ا1988). لكن سرعان ما طواها القدم أيضاً مع تطور الحروب المتنقلة في القرن الثامن عشر حين فقد الحصار أهميته. ففي أثناء الحروب النابليونية سهلت مدافع غريبوفال Gribeauval المناورات السريعة (منها مدفع من عيار 12 باوند يرمي مقذوفات وزنها 5.4 كغ ولا يتجاوز وزنه مع حامله 2 طن، مقارنة بالمدافع البريطانية التي تزن 3 أطنان) (تشارتراند Chartrand ا2003).

أما في البحار، فقد أصبحت السفن المزودة بالمدافع (التي سبق أن زودت باختراعين صينيين آخرين هما البوصلة والدفة المتمفصلة) أدوات السيطرة التقنية الأوروبية، وأدوات العدوان

التوسعي نحو مواقع بعيدة خلال العقود الأخيرة من عصر التوسع الاستعماري: ولم تنته سيطرتها إلا بإدخال المحركات البخارية البحرية، التي بدأت في العشرينيات من القرن التاسع عشر. وفي المياه القارية أعطت المدفعية بعيدة المدى القباطنة الإنجليز ميزة حاسمة أمام الأسطول الإسباني عام 1588 (فرنانديز أرمستو Fernándes Armesto ا1988؛ هانسون Hanson ا2011). بعد ذلك بقرن من الزمن زودت السفن الحربية الضخمة بنحو 100 مدفع كما حملت السفن البريطانية والهولندية التي خاضعت معركة لا هوغ La Hogue عام 1692 ما مجموعه 6.756 مدفعاً (م. س. أندرسون 1988). وصلت عمليات إطلاق الطاقة المدمرة المركزة إلى مستويات لامثيل لها حتى منتصف القرن التاسع عشر حين تم إدخال البارود المستخلص من النيترو سليلوز (في ستينيات القرن التاسع عشر) والديناميت (الذي سجلت براءة اختراعه باسم ألفرد نوبل عام 1867).

الفصل الخامس
الوقود الأحفوري، والكهرباء الأولية، والطاقة المتجددة

لا يمكن من حيث المبدأ لأي حضارة على الأرض أن تبصر النور ما لم تكن حضارة لمجتمع مشمس يعتمد على الإشعاع الشمسي الذي يمد المحيط الحيوي الذي يسمح بالعيش فيه بالطاقة وينتج كل ما يلزمناً من أغذية وأعلاف حيوانية وأخشاب. وقد عمدت مجتمعات ما قبل العصر الصناعي إلى استخدام هذا الفيض من الطاقة الشمسية بشكل مباشر كإشعاع وارد (التعرض لأشعة الشمس)، فجميع البيوت في تلك الفترة كانت مشمسة وتدفأ بطريقة سلبية. أما الاستخدام غير المباشر لهذه الطاقة، فلم يقتصر على زراعة محاصيل حقلية وأشجار متنوعة (سواء أكانت أشجار فاكهة أم أشجار جوز، أم تلك المزروعة لإنتاج الزيوت أو الأخشاب أو الوقود) وحصاد الكتلة الحيوية النباتية الناتجة عن الأشجار والأعشاب والنباتات المائية فحسب، بل اشتمل أيضاً على تحويل هبوب الرياح وتدفق المياه من أجل إنتاج طاقة ميكانيكية مفيدة.

لعل هبوب الرياح وتدفق المياه يمثلان تحولات شبه مباشرة للإشعاع الشمسي، فتدرجات الضغط الجوي ترتفع بسرعة نتيجة التسخين التفاضلي لسطح الأرض، بينما يوجه التبخر أو التبخر والنتح

دورة المياه حول العالم توجيها متواصلاً. كما يتحول الإشعاع الشمسي إلى غذاء وعلف وإلى شيء من وقود الكتلة الحيوية وذلك في فترات تتراوح من بضعة أيام (بالنسبة لمخلفات الحيوانات) وبضعة أشهر (في حال مخلفات المحاصيل تتراوح الفترة عادة ما بين 90-180 يوماً). وتحتاج الحيوانات المدجنة إلى فترة لاتتعدى بضع سنوات كي تصل إلى عمر الإنتاج، بالمقابل يبدأ الأطفال في المجتمعات التقليدية بالمساعدة في أعمال الكبار مع بلوغهم سن الخامسة أو السادسة. ولم يتأجل استخدام الإشعاع الشمسي لعدة عقود إلا مع بدء قطع الأشجار الناضجة وحرق أخشابها أو تحويلها إلى فحم نباتي (ولاحقاً حين بات قطع الأشجار العملاقة ممكناً مع استخدام المناشير الضخمة في الغابات المطرية المعمرة، واستمراره لعدة قرون).

ويعود أصل الوقود الأحفوري أيضاً إلى التحولات في الإشعاع الشمسي: فالخث والفحم ينتجان عن التغير البطيء الذي يصيب النباتات الميتة (الكتلة الحيوية النباتية)، والهيدروكربونات الناتجة عن التحولات الأكثر تعقيداً التي نشهدها في البحار والبحيرات والتي تصيب العوالق النباتية وحيدة الخلية (وبخاصة الزراقم cyanobacteria والدياتومات) والعوالق الحيوانية (وبخاصة المنخربات) وبعض الأشنيات واللافقاريات والأسماك (سميل 2008أ). وكان الضغط والحرارة العاملين السائدين المسببين للتحول، حيث استغرق الأمر بضعة آلاف من السنين لإنتاج أصغر أنواع الخث عمراً، بينما تطلب الأمر مئات ملايين السنين لإنتاج الفحم الصلب. ولعل منشأها هذا يفسر محتواها المرتفع من الكربون الذي يترجم إلى كثافات طاقة مرتفعة إلى جانب تدني ما تحتويه من المياه والشوائب غير القابلة للاحتراق (مربع 5-1).

إلا أن جزءاً يسيراً فقط من كربون الكتلة الحيوية المترسب في البداية تحول إلى وقود أحفوري (ديوكس 2003). فخلال تشكل الفحم، تحول 15 في المائة من الكربون النباتي إلى خث، الذي يمكن الاحتفاظ بنسبة تصل إلى 90 في المائة منه في الفحم، بينما يمكن في المناجم المفتوحة استخراج 95 في المائة من الفحم المتوافر من العروق الفحمية الكثيفة. بالنتيجة، يمكن استخراج حتى 13 في المائة من الكربون النباتي الأصلي القديم كفحم؛ وبالعكس، ثمة ثماني وحدات من الكربون القديم انتهى بها المطاف في الكربون المسوّق (ضمن مجال يتراوح في العادة بين 5-20 وحدة). بالمقابل، نرى أن عامل استرداد الكربون الكلي أدنى بالنسبة للنفط الخام والغاز الطبيعي. فهذان النوعان من الوقود ينشآن من المتعضيات المدفونة في رواسب البحار والبحيرات، وأن إنتاج الكربون المائي الأحفوري يسترد من الكربون في أحسن حالاته نسبة 1 في المائة، بينما تسترد في العادة نسبة 0.01 في المائة فقط من الكربون الموجود أصلاً في الكتلة الحيوية القديمة التي تحولت إلى نفط وغاز. ويقصد بنسبة الاسترداد البالغة 0.01 أن ثمة حاجة إلى 10.000 وحدة من الكربون القديم لإنتاج وحدة واحدة فقط من الكربون المباع على هيئة نفط خام أو غاز طبيعي.

بيد أن المجتمع الذي يستخدم الوقود الأحفوري ببساطة بديلاً عن الاستخدامات الشائعة للكتلة الحيوية النباتية، أي بحرقه بطريقة لا تمت للكفاءة بصلة لإنتاج الحرارة والضوء، سيبدو كمجتمع أغنى قياساً بأوروبا أو بالصين إبان القرن الثامن عشر. كما انطوى التحول إلى الوقود الأحفوري على فئتين من التطورات النوعية الجوهرية أدى تراكمهما واجتماعهما إلى إرساء أسس الطاقة في

العالم الحديث. ونبدأ بالفئة الأولى لهذه التطورات، حيث تمثلت في ابتكار الطرائق الجديدة لتحويل الوقود الأحفوري وتطويرها ونشرها للعامة على نطاق واسع في نهاية المطاف من خلال إدخال وسائط التحريك الأولية، وذلك بدءاً بالمحركات البخارية، مروراً بمحركات الاحتراق الداخلي، والعنفات البخارية، والعنفات الغازية، وصولاً إلى الطرائق الجديدة المتبعة لتحويل الوقود الخام، بما في ذلك إنتاج فحم الكوك المستخرج من الفحم، وتكرير الوقود الخام لإنتاج طيف واسع من السوائل ومواد غير الوقود، وكذلك استخدام الفحم والهيدروكربونات كمادة أولية في التركيبات الكيميائية الجديدة.

أما الفئة الثانية للاختراعات فوظفت الوقود الأحفوري لإنتاج الكهرباء التي مثلت نوعاً جديداً كلياً للطاقة التجارية. فكل وقود سواء أكان بالحالة الصلبة أم السائلة أم الغازية يمكن حرقه، لتنتج الحرارة إثر هذه العملية التي تستخدم بدورها لتحويل المياه إلى بخار، ومن ثم استخدام هذا البخار في تدوير عنفات تولد الكهرباء. لكن ومع الخطوة الأولى لتوليد الكهرباء لجأنا أيضاً إلى استخدام الطاقة الحركية للمياه بدلاً من توسيع استخدام البخار لإنتاج الكهرباء، الأمر الذي يصنِّف الطاقة

مربع 5-1

الوقود الأحفوري

تتراوح نسبة الكربون في الكتلة النباتية بين 45-55%، بينما تبلغ نسبته في الأنتراسيت نحو 100%، وتزيد نسبته في الفحم القَارِي الجيد على 85%، في حين يحتوي معظم النفط الخام على 82% - 84%، والميثان (CH_4)، وهو المكون السائد في الغاز الطبيعي، على 75%. يشكل الفحم القاري (الأسود) مجمل الكمية المستخرجة من الوقود الصلب حول العالم. ونظراً لاحتوائه دائماً على شيء من الرماد والكبريت، فإن حرق هذا الفحم يصدر عنه رماد متطاير وغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2، وهما مادتان بقيتا لما بعد الحرب العالمية الثانية مصدرين شائعين لتلوث الهواء في المناطق الصناعية والحضرية، وتسببتا في ترسيب مادة مرئية من هباب وحمض جاف فضلاً عن هطول الأمطار الحمضية (سميل 2008أ). يتكون النفط الخام من خلائط من هيدروكربونات معقدة ينتج عن تكريرها البنزين ووقود الطائرات النفاثة والديزل لمصلحة وسائط النقل، كما ينتج عن تكريرها زيوت الوقود المستخدمة في التدفئة وتوليد البخار، فضلاً عن إنتاج المزلقات ومواد تعبيد الطرقات. أما الغاز الطبيعي، الذي يعد الوقود الأحفوري الأنظف، فهو أكثر الهيدروكربونات خفة في الوزن. كما يمكن إنتاج الهيدروكربونات أيضاً من الفحم. وقد استخدم «غاز المدن» على نطاق واسع للإنارة في القرن التاسع عشر، بينما يؤدي تحويل الفحم إلى غاز حديثاً إلى إنتاج غاز تركيبي أشبه بالغاز الطبيعي. ويُذكر أن الألمان أنتجوا أنواع وقود تركيبي سائل لأول مرة على نطاق واسع إبان الحرب العالمية الثانية.

تتباين كثافات الطاقة بدرجة كبيرة بين أنواع الفحم، إلا أنها تتجانس نسبياً بالنسبة للهيدروكربونات. أما أنواع النفط الخام فتتفوق دائماً كمصادر للطاقة، فهي تحتوي على قرابة

ضعفي الطاقة في وحدة الكتلة قياساً بأنواع الفحم القاري الشائعة. وتستخدم الإحصائيات الدولية للطاقة واحدة من ثلاث فئات شائعة: مكافئ فحم قياسي (وقود يحتوي على 29.3 ميغا جول/كغ)، ومكافئ وقود (يعادل 42 ميغا جول/كغ) أو قيم وحدات طاقة قياسية (جول) أو وحدتين تقليديتين: الحريرة (الكالوري cal) والوحدات الحرارية البريطانية (Btu).

الوقود	كثافة الطاقة	
	ميغا جول/ كغ	ميغا جول/ م^3
صنوف الفحم		
أنتراسيت	31- 33	
وقود قاري	20- 29	
ليغنيت	8- 20	
الخث	6- 8	
النفط الخام	42- 44	
الغاز الطبيعي		29- 39

الكهرمائية شكلاً من أشكال الكهرباء الأولية (قياساً بالكهرباء الناتجة عن احتراق الوقود). أما الإضافات الأخرى على هذه الفئة فاشتملت على الكهرباء التي تولدها محطات حرارية أرضية،

ومن خلال الانشطار النووي، ومؤخراً باستخدام العنفات الكبيرة التي تعمل بطاقة الرياح والخلايا الكهرضوئية، أو إشعاع الشمس المُركّز.

لا شك في أن الاتجاه طويل الأجل واضح للعيان: فقد عكفنا على تحويل حصة متزايدة باطراد من الوقود الأحفوري إلى كهرباء حرارية، كما توسعنا في قدرات توليد الكهرباء الأولية نظراً لأن استخدام الكهرباء يبقى الشكل الأكثر ملاءمة وتنوعاً، ناهيك عن أنها الشكل الأنظف للطاقة الحديثة عند استخدامها. وفي الجزء الأول من هذا الفصل، سأقدم وصفاً لكثير من التطورات الرئيسة على مستوى التحول من وقود الكتلة الحيوية النباتية وأنواع الطاقة الحية إلى الوقود الأحفوري ووسائط التحريك الأولية؛ أما في الجزء الثاني، فأتتبع الابتكارات الفنية المهمة التي تجتمع لتشكل سمة الفعالية والموثوقية والمقدرة الاقتنائية لدى المجتمعات الحديثة المستخدمة للطاقة المرتفعة.

التحول الهائل

دام استخدام الوقود الأحفوري في بعض البلدان لقرون، رغم انحصاره في كميات متواضعة نسبياً، قبل أن يحل سريعاً محل وقود الكتلة الحيوية وطاقة العمالة الحية. ولعل أفضل الأمثلة على ذلك الفحم والغاز الطبيعي في الصين، والفحم في إنجلترا. فالصينيون استخدموا الفحم على نطاق صغير على المستوى الصناعي إبان حكم أسرة هان (206 قبل الميلاد - 220 ميلادي)، كما كان استخدام الفحم بارزاً في عديد من مناطق إنجلترا وويلز واسكتلندا، واستخرج بسهوله، بعضه خلال الحكم الروماني، والجزء الأكبر كان في العصور الوسطى. إلا أن نِف Nef ا(1932، 12) أشار إلى أن:

> حرق الفحم في موقد العائلة أو في المطبخ كان نادراً لغاية القرن السادس عشر، واقتصر استخدامه على من عجز عن شراء الخشب من الفقراء المتوزعين على مسافات تزيد على ميل أو اثنين من مناطق ظهور الفحم، وحتى في المناطق المحيطة بها.

كان الفحم الوقود الأحفوري السائد في أثناء المرحلة الانتقالية الأوروبية. أما الاستثناء الأبرز الذي نشّط الاقتصادات الأكثر تأثيراً في القارة في مطلع العصر الحديث فيتمثل في اعتماد العصر الذهبي الهولندي بدرجة كبيرة على الوقود المستمد من الخث المحلي في القرنين السابع عشر والثامن عشر. أما حجم استخراجه فيوضحه تقدير دي زيو De Zeeuw ا(1978) الذي ذكر أنه من بين نحو 175.000 هكتار من أراضي الخث المرتفعة في هولندا، لم يبق سوى 5.000 هكتار بحالة سليمة نوعاً ما. كذلك بدأت الولايات المتحدة وكندا إبان مرحلتيهما الانتقاليتين باستخدام الفحم، لكن، وخلافاً لأوروبا، تحول هذان الاقتصادان عاجلاً وبصورة أسرع نحو النفط والغاز الطبيعي (سميل Smil ا2010أ). وبالمثل، كانت روسيا إحدى البلدان الرائدة على مستوى الإنتاج التجاري للنفط على نطاق واسع، واستفادت لاحقاً من موارد الغاز الطبيعي الهائلة لديها.

وفي الوقت الذي خفضت جلّ أوروبا اعتمادها على وقود الكتلة الحيوية إلى مستويات جدّ متدنية في القرن التاسع عشر، نجد أن تجنب استخدام وقود الكتلة الحيوية النباتية لا يزال بانتظار التطبيق في كثير من البلدان متدنية الدخل. وتختلف أنواع الوقود باختلاف الأنماط. وهنا علينا استخدام صيغة الجمع للتأكيد على تباين تلك الأنواع. فللفحم والنفط الخام والغاز الطبيعي طيف واسع من الخصائص (انظرمربع 5-1)، حيث يمكن استخدام الحرارة الناتجة عن احتراقها مباشرة في أعمال الطبخ أو التدفئة أو صهر المعادن، أو استخدامها استخداماً غير مباشر لإمداد شتى وسائط التحريك الأولية بالطاقة. وقد بات المحرك البخاري في القرن التاسع عشر المحرك الأساسي الرائد الذي يعتمد على الطاقة غير الحية (أي الميكانيكية). أما محركات الاحتراق الداخلي والعنفات البخارية فلم تبدأ مسيرتها التجارية إلا في تسعينيات القرن التاسع عشر. وفي الفترة التي سبقت عام 1950 باتت محركات البنزين والديزل وسائط التحريك الأولية السائدة في وسائط النقل، في حين استخدمت العنفات البخارية في توليد الكهرباء على نطاق واسع (سميل 2005)؛ أما العنفات الغازية (الثابتة منها التي تستعمل في توليد الكهرباء أو تلك المخصصة لإمداد الطائرات والسفن بالطاقة) فقد انتشر استخدامها بعد عام 1960 (سميل 2010أ).

تبين الدراسات التي أجريت مؤخراً على التحولات التي مر بها استخدام الطاقة كثيراً من القواسم المشتركة التي تحكم هذه التحولات التدريجية والتي تحدد العوامل الرئيسة التي تسببت إما في دفع هذه العملية قُدماً أو في إعاقتها (مالانيما Malanima ا2006؛ فوكيت Fouquet ا2010؛ سميل 2010أ؛ بيرسون Pearson وفوكسون Foxon ا2012؛ ريجلي Wrigley ا2010، 2013)، حيث تراوحت هذه القواسم المشتركة من الأولويات التقنية التي اقترنت بإجراء تجارب لفترات مديدة، أعقبتها مرحلة الذروة في استخدام الطاقة وانتشارها (ويلسون 2012)، إلى بعض التحولات الأسرع التي ظهرت سابقاً لدى صغار مستهلكي الطاقة (روبيو Rubio وفولتشي Folchi ا2012). أضف إلى ذلك أن بعض البلدان الصغيرة تخطت مرحلة الفحم، بما فيها البلدان ذات المخزونات الوفيرة من هذا الوقود، لتلجأ إلى الاعتماد سريعاً على النفط الخام سواء أكان محلياً أو مستورداً وهو الدارج. لكن في جميع الأحوال دلت النتيجة النهائية على زيادة هائلة على مستوى استهلاك الفرد للطاقة الأولية، حيث كان استخدام المجتمعات سابقاً محدوداً بحصاد وقود الكتلة الحيوية النباتية، لتدخل أنواع الطاقة الحية مرحلة جديدة من تنويع الإمداد بالوقود الأحفوري وانتشار المحركات الميكانيكية الأساسية على نطاق واسع.

بدايات استخراج الفحم وانتشاره

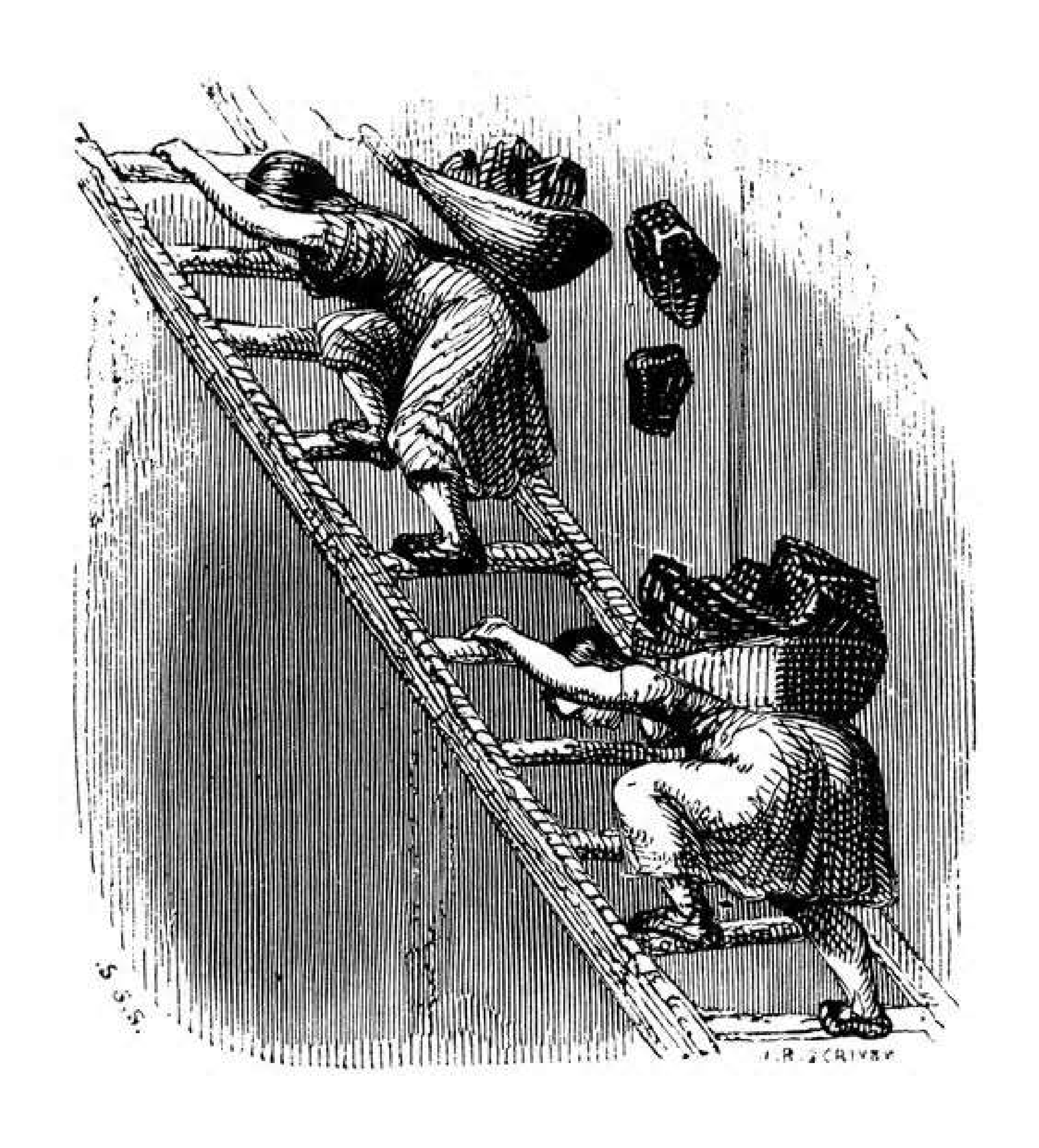
يعود البدء باستخدام الفحم إلى العصور القديمة حين كانت أهم استخدامات الوقود عند أسرة هان الحاكمة في الصين تتمثل في إنتاج الحديد (نيدام Needham ا1964). وتظهر السجلات الأوروبية أن استخراج الفحم لأول مرة حدث في بلجيكا عام 1113، بينما نقلت أول شحناته إلى لندن عام 1228، وصُدّر أول مرة من منطقة تاينموث Tynemouth إلى فرنسا عام 1325، في حين كانت إنجلترا أول من نفذ التحول من الوقود النباتي إلى الفحم في القرنين السادس عشر والسابع عشر (نيف Nef ا1932). وفي أعقاب عام 1500، أدى شح الأخشاب الذي وصل إلى

درجة مخيفة في البلد إلى ارتفاع تكاليف الحطب والفحم النباتي والخشب الخام ثم تفاقمت حالات الشح أكثر فأكثر في القرن السابع عشر بفعل تزايد الطلب على الحديد وزيادة الحاجة إلى الأخشاب لصناعة السفن. لم يكن التغلب على النقص بزيادة الواردات من الحديد المطاوع والأخشاب إلا حلاً مؤقتاً وحسب (توماس Thomas ا1986). وبدا واضحاً أن زيادة كمية الفحم المستخرج محلياً هي الحل حيث فتحت حقول الفحم كافة تقريباً في البلد ما بين 1540 و1640.

وبحلول عام 1650 تجاوز الإنتاج السنوي من الفحم في إنجلترا مليوني طن، بينما استخرجت 3 ملايين طن في العام في مطلع القرن الثامن عشر، وأكثر من 10 ملايين طن في العام مع نهاية القرن. واستدعت الزيادة في استخدام الفحم إيجاد حل لكثير من المشكلات الفنية والتنظيمية المرتبطة بالتعدين والنقل والاحتراق. وقاد استنزاف العروق الفحمية البارزة إلى التعمق بأعمال الحفر أكثر فأكثر. صحيح أن عمق المناجم نادراً ما تجاوز 50 م في أواخر القرن السابع عشر، إلا أن أعمقها تجاوز 100 م بُعيد عام 1700، ثم وصل إلى 200 م بحلول عام 1765، وإلى 300 م عقب عام 1830. وفي تلك الفترة تراوح الإنتاج اليومي للمنجم ما بين 20 و40 طناً، قياساً ببضعة أطنان في القرن الذي سبقه. واستدعت الحفر شديدة العمق ضخ كمية أكبر من المياه، فضلاً عن الحاجة إلى مزيد من الطاقة لتهوية المنجم، ورفع الفحم من الحفر العميقة وتوزيعه، حيث اعتمدت النواعير وطواحين الهواء والخيول لتأمين هذه الاحتياجات من الطاقة. أما استخراج الفحم من المناجم فاعتمد على طاقة العمالة البشرية الشاقة.

استخدمت الفؤوس والمعاول والأسافين والمطارق لاستخراج الفحم من العروق الفحمية العمودية منها والأفقية عبر أنفاق ضيقة. وتولى العمال تعبئة الفحم في السلال وجرّها على زلاجات خشبية إلى قاع الحفرة، حيث يقوم عامل التحميل بتعليقها على الحبال، ليرفعها بعد ذلك عامل المرفاع إلى أعلى الحفرة، وأخيراً يقلبها مساعد عامل المرفاع فوق الأكوام. كان الرجال الراشدون هم من يقومون بجلّ أعمال استخراج الفحم، بينما اقتصرت أعمال الصبية بين سن السادسة إلى الثامنة على تنفيذ مهام أخف. كذلك نفذت النساء أو الفتيات اليافعات بعضاً من الأعمال الشاقة في كثير من الحفر إذ كان عليهن حمل الفحم إلى السطح بعد تسلق سلالم شاهقة والسلال الثقيلة ترخي بأوزانها على ظهورهن وهي مثبتة بأحزمة تشد إلى جباههن (الشكل 5-1). وفي عام 1812 نشر روبرت بولد Robert Bald، وهو مهندس مدني اسكتلندي ومسّاح للمعادن، استطلاعاً حول حياة هؤلاء النسوة، وحريٌّ بنا اقتباس ما جاء به في هذا المقام، لا بسبب وصفه المؤلم للمشاق التي أثقلت كاهل تلك النسوة، بل لما قدمه من تقييم دقيق للجهد الجسدي الحقيقي الذي قمن به (مربع 5-2).

يعد وصف بولد المفعم بالحيوية توضيحاً مثالياً لحقيقة راسخة حول دراسات الطاقة؛ وهو مثال يستحق الإعجاب يبين أن كل انتقال إلى شكل جديد من أشكال الطاقة ينبغي تغذيته باستخدام مكثف لأنواع الطاقة ووسائط التحريك الأولية المتوافرة، وهذا يعني اعتماد التحول من الخشب إلى الفحم على طاقة العضلات البشرية، واعتماد تطوير النفط على حرق الفحم لتوفير الطاقة اللازمة. وكما أؤكد في الفصل الأخير، فإن الخلايا الضوئية الشمسية وعنفات الرياح اليوم ما هي إلا تجسيد



الشكل 5-1

نساء تحملن الفحم في أحد المناجم الأسكتلندية في مطلع القرن التاسع عشر (Corbis).

لمصادر الطاقة الأحفورية المطلوبة لصهر المعادن المنشودة، وتركيب البلاستيك المطلوب ومعالجة مواد أخرى تتطلب مدخلات طاقة عالية.

وبالنسبة للحفر في الأعماق السحيقة، استخدمت الخيول لتدوير الرحى المخصصة لرفع الفحم أو لضخ المياه. وبعد عام 1650، استخدمت الخيول، والحمير تحت الأرض حيث استخدمت العربات التي تجرها الخيول (على القضبان الحديدية أحياناً) لنقل الفحم إلى مسافات بعيدة وإلى الأنهار أو المرافئ لتحميله على قوارب القنوات المائية أو لوضعه على متن السفن. ومع حلول القرن السابع عشر بات الاستخدام المنزلي للفحم شائعاً، كما استخدم لتسخين أفران الحدادة وشي الطوب والبلاط والخزف، وكذلك في صناعة النشاء والصابون واستخراج الملح. إلا أن انتقال الشوائب إلى المنتج النهائي جعل من استخدامه المباشر ضرباً من المستحيل في صناعة الزجاج وتجفيف شعير المالت، والأهم من هذا وذاك استحالة استخدامه في صهر الحديد. حُلت مشكلة صناعة الزجاج أولاً قرابة عام 1610 مع إدخال الأفران الارتدادية (العاكسة للحرارة)، حيث تم تسخين المواد الأولية في أوعية مغلقة. أما الاحتياجات الأخرى فلم تتحقق إلى أن توافر فحم الكوك (انظر القسم التالي).

أما الاستخدام الآخر غير المباشر للفحم والذي اكتسب أهمية أيضاً فجاء مع إنتاج غاز الفحم أو غاز المدن من خلال كربنة الفحم القيري عن طريق تسخين الوقود إلى درجات حرارة مرتفعة داخل أفران ذات إمداد محدود بالأكسجين (إلتون Elton ا1958)، حيث نفذت أول أعمال تركيب هذه الأفران عملياً بشكل مستقل في الفترة بين عامي 1805-1806 في معامل إنجليزية لإنتاج خيوط القطن. وتم تأسيس شركة لتغذية لندن بالغاز بشكل مركزي عام 1812. ولعل ما ضمن الانتشار السريع للإنارة بالغاز كان مستوى الاستجابات السريعة الأفضل، ونزع الكبريت من الغاز، واعتماد تقنية جديدة لصنع الأنابيب الحديدية بقطر أصغر، ناهيك عن استخدام حراقات أكثر كفاءة. إلا أن استخدام الغاز لم ينته مع ظهور المصابيح الكهربائية. إذ أعطى قميص الغاز المتوهج، الذي تنسب براءة اختراعه عام 1885 إلى كارل أوير فون

مربع 5-2

استطلاع حول ظروف حاملات الفحم تحت الأرض في اسكتلندا والمعروفات باسم «الحاملات»

كان ذلك عنواناً لإضافة على إصدار بعنوان «رؤية عامة حول تجارة الفحم في اسكتلندا» نشر عام 1812، وفيما يلي النتائج الأساسية (بولد 1812، 131-132، 134):

الأم... تنزل إلى الحفرة حيث بناتها موجودات.. وما أن تضع كل ذات سلة مختلفة الشكل سلتها على الأرض، إلى أن تبدأ دحرجة قطع الفحم الكبيرة، يتبعها مشوار حمل هذا الوزن، الذي عادة ما يتطلب رجلين لرفعه ووضعه على ظهورهن... تنطلق الأم أولاً وبين أسنانها تحمل شمعة

مضاءة... تتبعها الفتيات... وبخطوات منهكة ومتثاقلة يصعدن السلالم، صعوداً مقترناً بالبكاء الذي زاد في حرقته مشقة العمل... تُنفذ المهمة.. التي لا يمكن للمرء تصورها... أما ثقل الفحم الذي تنقله امرأة واحدة يومياً إلى أعلى الحفرة فيصل إلى 4080 باونداً، مع أمثلة عدة عن حمل ثقل يصل إلى طنين.

لنفترض أن وزن الجسم يبلغ 60 كغ، وحمل كمية فحم يومياً تبلغ 1.5 طن من عمق يصل إلى 35 م يتطلب وحده من الطاقة قرابة 1 ميغا جول، وإلى جانب تكلفة حمل الفحم على مسار أفقي، أو خفيف الميل، من تحت الأرض إلى قاع الحفرة، وفوق الأرض إلى نقطة التوزيع، فإن تكلفة رحلة العودة ستوصل إجمالي العمل اليومي إلى نحو 1.8 ميغا جول. ولو افترضنا أن كفاءة العمل تبلغ 15%، فإن الأنثى البالغة الحاملة للفحم تنفق نحو 12 ميغا جول من الطاقة، أي بمعدل نحو 330 واطاً في عشر ساعات في اليوم. وتؤكد القياسات الحديثة حول صرف الطاقة في العمل الشاق أن العمل بمعدل 350 واطاً يبقى مستداماً خلال وردية ثماني ساعات، لكن من النادر فقط أن يتم تجاوز هذا المعدل (سميل 2008أ). ومن الواضح أن هؤلاء النساء الحاملات للفحم بقين تعملن يوماً تلو الآخر لسنوات طويلة - فقد بدأن العمل وهن في السابعة من العمر، وبقين فيه إلى أن بلغن الخمسين عند الحد الأقصى لطاقة الإنسان.

فيلسباخ، صناعة الغاز القدرة على منافسة المصابيح الكهربائية لبضعة عقود أخرى.

كان انتشار مناجم الفحم خارج إنجلترا بطيئاً إلى حدّ ما في القرن الثامن عشر. ففي البداية كان الإنتاج الرئيس يأتي من شمال فرنسا، وتحديداً من منطقتي ليج ورور، وكذلك من بقاع في بوهيميا وسيليسيا. أما استخراج الفحم في أمريكا الشمالية فلم يبدأ على المستوى الوطني فعلياً إلا في مطلع القرن التاسع عشر. ولعل الإحصائيات التاريخية لإنتاج الفحم والتقديرات الفضلى المتاحة (الأضعف من حيث الموثوقية) لاستهلاك الحطب على المستوى الوطني مكنت من حصر، وفي أحيان أخرى من تحديد، التواريخ التي تجاوز الفحم فيها الخشب وبدأ في الإسهام بأكثر من نصف الطاقة الرئيسة على مستوى البلد (سميل 2010أ). وهذا ما حدث في إنجلترا وويلز في فترة مبكرة على نحوٍ استثنائي، حيث كان من الممكن إجراء تحديد تقريبي لموعد أول التحولات التي طرأت على استخدام الطاقة.

وخلص واردي Warde ا(2007) إلى أن اختيار موعد دقيق للانتقال بين الخشب والفحم أمر اعتباطي، بيد أن عمليات إعادة البناء التي أجراها تبين أن الاحتمال الأكبر لتغلب الفحم على الكتلة الحيوية كمصدر للحرارة حدث في عام 1620 على وجه التقريب، وربما قبل ذلك بفترة وجيزة. وبحلول عام 1650 بلغ إسهام الفحم 65%، وفي عام 1700 وصل إلى 75%، وارتفع في عام 1800 إلى قرابة 90%، ليتجاوز 98% في خمسينيات القرن التاسع عشر (آخر نسبتين سُجلتا في المملكة المتحدة)، حيث تواصل التفوق البريطاني في ميدان الفحم لفترة قرن آخر. ففي عام 1950 قدم الفحم 91% من الطاقة الرئيسة للبلد، واستمر بتزويد 77% من الطاقة بحلول عام

1960. وهكذا نرى أن الفحم هيمن (بأكثر من 75%) على استخدام الطاقة في البلد طيلة 250 سنة، وهي الفترة الأطول قياساً بأي بلد آخر.

في مطلع العهد النابليوني حصلت فرنسا على أكثر من 90% من طاقتها الأساسية من الخشب، إذ بقي إسهامه في حدود 75% عام 1850، قبل أن ينخفض إلى أقل من 50% بحلول عام 1875 (بارجوت Barjot ا1991). وظل الفحم الوقود السائد في فرنسا حتى أواخر خمسينيات القرن العشرين حين احتلّ النفط المستورد مكان الصدارة. أما استخراج الفحم في المستعمرات الأمريكية فقد بدأ عام 1758 في فيرجينيا. وفي مطلع القرن التاسع عشر، أمست ولايات بنسلفانيا وأوهايو وإيلينوي وإنديانا الولايات المنتجة للفحم (إيفنسون Eavenson ا1942). واقتصرت نسبة امداد الفحم بالوقود على 5% فقط من إجمالي الطاقة الرئيسة بحلول عام 1843، إلا أن ما تبعه من زيادة سريعة في استخراج الوقود رفع نسبة الإسهام إلى 20% مع مطلع ستينيات القرن التاسع عشر. وفي عام 1884 احتوى الفحم المستخرج على كم أكبر من الطاقة قياساً بالاستهلاك الهائل من الحطب في البلد (شورSchurr ونيتشيرت Netschert ا1960). وفي عام 1880، وهو تاريخ بدء الإحصائيات التاريخية اليابانية، شكل الخشب (والفحم النباتي المشتق منه) 85% من الطاقة الرئيسة للبلد، لكن بحلول عام 1901 رفعت أنشطة التحديث المكثفة إسهام الفحم إلى أكثر من 50% لتصل إلى ذروتها بنسبة 77% عام 1917 (سميل 2010أ).

أما الإمبراطورية الروسية، ذات الغابات الشجرية مترامية الأطراف في شمال البلاد ضمن القسم الأوروبي وسيبيريا، فقد كانت مجتمعاً خشبياً مثالياً. ووفقاً للإحصائيات التاريخية السوفيتية، فقد وفر الحطب 20% من إجمالي الطاقة الرئيسة المنتجة عام 1913 (تسو 1977). إلا أن هذه النسبة اقتصرت فقط على الوقود المنتج تجارياً، والذي لم يتعدَ جزءاً يسيراً من الطاقة المطلوبة للتدفئة الداخلية في روسيا. فحتى البيت صغير المساحة احتاج لما لا يقل عن 100 جيغا جول/عام. وعلى أكثر تقدير استطاع الخشب إمداد 75% من كامل الاحتياج من الطاقة عام 1913، بينما بدأ النفط والفحم بتوفير أكثر من نصف الطاقة الرئيسة مجتمعة في مطلع ثلاثينيات القرن الفائت (سميل 2010أ).

كانت الصين آخر البلدان ذات الاقتصاد الرائد على مستوى إجراء هذا التحول من الكتلة الحيوية النباتية إلى الفحم، حيث تأخرت العملية بفعل أزمات القرن العشرين التي لم تعرف لها نهاية، إذ بدأت بانهيار الحكم الإمبراطوري عام 1911، واستمرت مع الحرب الأهلية المديدة بين الشيوعيين والكومينتانج (1927-1936، 1945-1950) وكذلك الحرب على اليابان (1933-1945)، لتأتي بعد ذلك عقود من سوء الإدارة الاقتصادية للماويين، والتي أسفرت تبعاتها عن المجاعة العظيمة، أكبر مجاعة على مستوى العالم من صنع ماو Mao ا(1958-1961) وما أطلق عليه جنوناً اسم «الثورة الثقافية» (1966-1976). نتيجة لذلك، لم يبدأ الإمداد بوقود الكتلة الحيوية سوى عام 1965 حيث زود بأقل من نصف الطاقة الرئيسة في الصين، وبحلول 1983 تراجع إسهام هذا الوقود إلى ما من دون 25%، ليهوي عام 2006 إلى أقل من 10% (سميل 2010أ).

من فحم الخشب إلى فحم الكوك

لا شك في أن استبدال الفحم النباتي بفحم الكوك الفلزي لصهر حديد الصب يندرج بين أعظم الابتكارات التقنية في العصر الحديث، حيث حقق تغييرين جوهريين، الأول خدمة اعتماد الصناعة على الخشب (بالتالي الحاجة إلى توافر مواقع للأفران على مقربة من المناطق الحراجية) والثاني، إتاحة صناعة أفران ذات سعات أكبر وبالتالي تحقيق زيادة سريعة في الإنتاج السنوي. أضف إلى ذلك أن وقوداً فلزياً متفوقاً قد استبدل به. إذ إن الانحلال الحراري (التقطير المدمر) للفحم - أي تسخين الفحم القيري (ذي المحتوى المنخفض من الرماد والكبريت) بمعزل عن الأكسجين - ينتج مصفوفة شبه نقية من الكربون ذات كثافة ظاهرية منخفضة (0.8 -1 غ/سم^3) لكنه بالمقابل ينتج كثافة مرتفعة من الطاقة (31-32 ميغا جول/كغ)، ناهيك عن أن الكوك أقوى من حيث الضغط قياساً بالفحم النباتي، ما يجعله قادراً على دعم حمولات أثقل للحديد الخام والحجر الجيري في أفران الصهر الأعلى (سميل 2016).

استخدم فحم الكوك في إنجلترا منذ مطلع أربعينيات القرن السابع عشر لتجفيف المالت (حيث لا يمكن استخدام الفحم نظراً لأن احتراقه يؤدي إلى انبعاثات الهباب وأكسيد الكبريت)، في حين لم يبدأ استخدام الوقود الفلزي سوى عام 1709، وذلك عندما تولى أبراهام داربي Abraham Darby ا(1678-1717) ريادة هذه الممارسة في قرية كولبروكدايل. ووفر استخراج فحم الكوك إمداداً غير محدود افتراضياً من الوقود الفلزي، إلا أن العملية انطوت في بادئ الأمر على الكثير من الإسراف والتكاليف المرتفعة، ولم تُعتمد على نطاق واسع إلا بعد عام 1750 (هاريس Harris ا1988؛ كينج King ا2011). كما لم يحذُ صناع الحديد في النصف الأول من القرن الثامن عشر حذو داربي مباشرة، وهذا يعزى بدرجة كبيرة إلى تراجع أسعار قضبان الحديد، حيث تنافس الإنتاج المحلي مع الواردات السويدية. ومع تحسن السوق في منتصف خمسينيات القرن الثامن عشر، بدأ صنّاع الحديد ببناء أفران جديدة تعمل بوقود الكوك، وبحلول عام 1770 استُخدم الكوك لإنتاج 46% من الحديد في بريطانيا (كينج 2005)، حيث أدى هذا التحول التاريخي إلى إنهاء الضغط على موارد الأخشاب بطريقة لا تسمح بتعويضها، والذي عانت منه بريطانيا (انظر مربع 4-22) مثلما عانت منه سائر بلدان القارة، فعلى سبيل المثال، في عام 1820 خصص 52% من مساحة الغابات في بلجيكا لإنتاج الفحم النباتي الفلزي (مادوريرا Madureira ا2012).

لم تكن الحالة الأمريكية بهذا المستوى من الإلحاح في مطلع القرن التاسع عشر (انظر مربع 4-23)، وبحلول عام 1840 استمر صهر حديد الصب باستخدام الفحم النباتي، إلا أن التوسع الذي شهدته هذه الصناعة لاحقاً أسفر عن تحول سريع إلى الأنثراسيت أولاً ثم إلى الكوك، الذي بات سائداً بحلول عام 1875. أنتج الكوك بإسراف داخل أفران قفيرية الشكل (سيكستون Sexton ا1897؛ واشلاسكي Washlaski ا2008). إلا أن التطورات الجذرية لم تأتِ إلا مع اعتماد أفران الكوك المخصصة للمنتجات الثانوية، حيث تم في هذه الافران استرجاع الغازات الغنية بغاز الكربون الذي استخدم وقوداً، بينما استخدمت المواد الكيميائية (القار والبنزول والتولول) كمواد أولية، وسلفات الأمونيوم كسماد. ويعود تاريخ استخدامها في أوروبا إلى عام 1881، وفي

الولايات المتحدة إلى عام 1895، وبقيت تصاميمها المحسنة عماد الاستخدام الحديث للكوك (هوفمان Hoffmann ا1953؛ موساتي Mussatti ا1998).

بدأت أفران الصهر العاملة على وقود الكوك بارتفاع (8 أمتار تقريباً) وبحجم (ا<17م^3) وهو الارتفاع عينه الذي كانت عليه بنى الأفران المعاصرة الكبيرة العاملة على الفحم النباتي، إلا أنه في عام 1810 صارت الأفران العاملة على وقود الكوك بارتفاع 14 م (وبحجم >ا70م^3) كما شاع آنذاك. وفي الفترة التي أعقبت عام 1840 قدم لوثيان بل Lowthian Bell ا(1816-1904)، الخبير البريطاني الرائد في علم المعادن، تصميماً جديداً مهماً لتلك الأفران، حيث باتت أفران الصهر الكبيرة في نهاية القرن التاسع عشر بارتفاع ناهز 25 م، وبحجم داخلي وصل إلى 300 م^3 تقريباً (بل Bell ا1884، سميل 2016). أما الأفران الأكبر والتي اتسمت بإنتاجيات أعلى (ا<10 أطنان/يوم لأفضل الأفران العاملة بوقود الفحم النباتي مقابل >ا250 طناً/يوم للأفران العاملة بوقود الكوك عام 1900) فقد عززت إنتاج حديد الصب عالمياً من كمية لا تزيد على 800.000 طن عام 1750 إلى قرابة 30 ميغا طن عام 1900، ما أرسى أسس تطوير صناعة الفولاذ الحديثة بعد عام 1860 وتوفير المعدن الرئيس المطلوب لعملية التحول الصناعي (سميل 2016).

المحركات البخارية

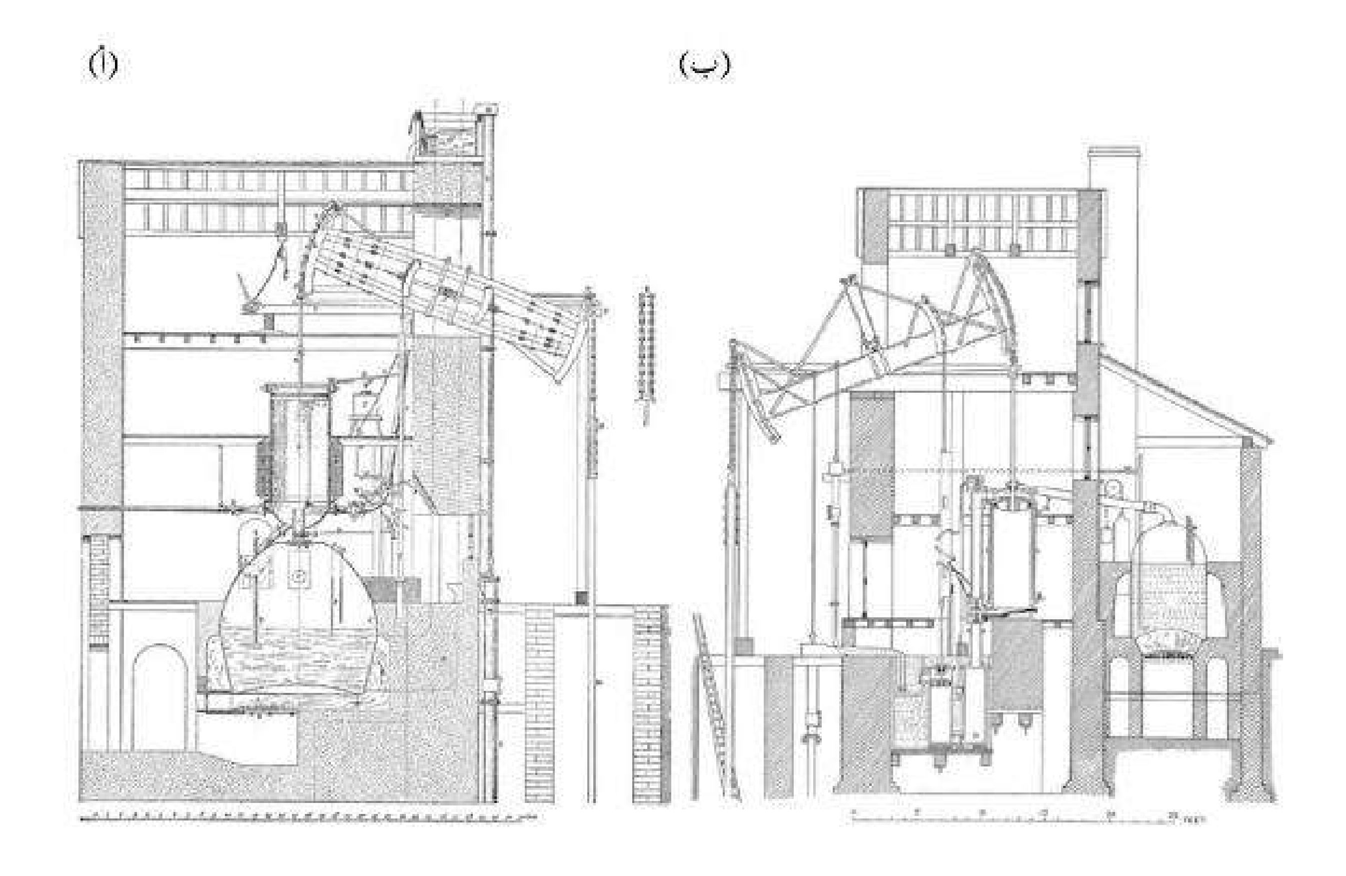
كان المحرك البخاري أول محرك رئيس جديد أدخل بنجاح منذ اعتماد طواحين الهواء التي سبقته بأكثر من 800 عام. هذا المحرك كان أول محرك عملي واقتصادي موثوق يحول الطاقة الكيميائية للفحم إلى طاقة ميكانيكية، وأول محرك أساسي غير حيوي يعمل بطاقة الوقود الأحفوري بدلاً من التحول السريع نسبياً باستخدام الإشعاع الشمسي. وقد ولدت المحركات الأولى التي ظهرت في مطلع القرن الثامن عشر حركة ارتدادية مناسبة للضخ، لكن قبل عام 1800 ظهرت تصاميم لحركة دورانية عملية (ديكنسون Dickinson ا1939؛ جونز Jones ا1973). وما لا شك فيه أن اعتماد المحرك البخاري حمل أهمية هائلة لمصلحة التحول الصناعي والتحضر والنقل العالمي، كما كُتب الكثير عن تأثيراته (فون تونزيلمان von Tunzelmann ا1978؛ هنتر Hunter ا1979؛ روزن Rosen ا2012).

وفي الوقت عينه، شهد طرح المحركات البخارية تجارياً واعتمادها على نطاق واسع تطوراً بطيئاً، استغرق أكثر من قرن، وحتى في أعوام انتشارها السريع بعد عام 1820، كان عليها التنافس (كما أشرنا آنفاً في الفصل الرابع) مع النواعير والعنفات. صحيح أن استخدام هذه المحركات حدّ من أعمال كثيرة قام بها الإنسان والحيوان (كضخ المياه من المناجم، وأداء العديد من المهام المرتبطة بالتصنيع)، إلا أن الاعتماد المطلق على العمالة البشرية والجر بوساطة الحيوانات حافظ على منحاه المتزايد على مدار القرن التاسع عشر بأكمله، حيث أدت هذه الحقائق إلى إعادة النظر في الفهم الذي ساد بين الناس على نطاق واسع بأن اعتماد المحركات البخارية يعادل إلى حدّ ما الحركة التي عرفت - خطأ - باسم «الثورة الصناعية».

أما الفكرة السائدة بأن هذا العصر يمثل فترة التغيير الاقتصادي والاجتماعي الصانع للتاريخ (آشتون Ashton ا1948؛ لانديس Landes ا1969؛ موكير Mokyr ا2009) فبقيت موضع تساؤل من قِبَل من يرى في العصر ظاهرة أكثر تقييداً، لا تتعدى كونها محلية؛ ظاهرة شهدت تحولات تقنية اقتصر تأثيرها على بعض الصناعات (كالقطن وصناعة الحديد والنقل) مخلفة غيرها من القطاعات الاقتصادية الأخرى في حالة ركود ما قبل العصر الحديث لغاية منتصف القرن التاسع عشر (كرافتس Crafts وهارلي Harley ا1992). ومضى ثلة من النقاد إلى ما هو أبعد من ذلك، حيث اعتبروا جدلاً أن التغيير كان طفيفاً جداً قياساً بالاقتصاد الكلي، بحيث إن اسم «الثورة الصناعية» بحد ذاته كان مغلوطاً (كاميرون Cameron ا1982)، بمعنى أن فكرة الثورة الصناعية البريطانية بمجملها كان محض وهم (فوريس Fores ا1981).

وإذا ما تحدثنا بدقة أكبر وجدنا أن البيانات البريطانية تبين أن ربط النمو الاقتصادي في القرن التاسع عشر بشكل رئيس بالبخار استنتاج أسيء فهمه (كرافتس Crafts وميلز Mills ا2004). فعلى الرغم من ظهور المحركات البخارية، إلا أن «الاقتصاد البريطاني حافظ على سمته التقليدية إلى حد كبير لمدة 90 عاماً بعد 1760» (سوليفان Sullivan ا1990، 360)، و«لم يكن العامل البريطاني الأنموذجي في منتصف القرن التاسع عشر مشغلاً للآلات في أحد المعامل، بل بقي حرفياً تقليدياً أو عاملاً أو خادماً محلياً» (موسون Musson ا1978، 141). إلا أن هذا الحُكم يتضح أكثر عندما يُنظر إلى العملية من زاوية إجمالي استهلاك الطاقة، والزيادة الهائلة التي طرأت عليه، حيث بلغ إجمالي استهلاك الطاقة بحسب ما جاء عن ريجلي (2010) في إنجلترا وويلز نحو 117 بيتا جول في الفترة 1650-1659، و231 بيتا جول بعد قرن من الزمن، و1.83 إكسا جول في الفترة 1850-1859، أو بزيادة نحو 15 ضعفاً في فترة 200 سنة، ما فتح الباب أمام نمو اقتصادي أسيّ، وكان المحرك البخاري، بلا شك، العامل الميكانيكي الرئيس وراء التحول إلى العصر الصناعي والتحضر.

إلا أن تأثير هذا المحرك البخاري لم يظهر بشكل كامل إلا بعد عام 1840، وذلك بالتزامن مع أعمال الإنشاء السريعة للخطوط الحديدية وصناعة السفن البخارية، فضلاً عن تزايد أعمال تركيب هذا النوع من المحركات كمنتِج مركزي للطاقة الحركية (التي تنقلها الأحزمة إلى آلات فردية) في مشاريع التصنيع. وبدأ التطور العملي لهذا المحرك من خلال تجارب دينيس بابين Denis Papin ا(1647-1712) باستخدام أنموذج صغير صُنع عام 1690. وعقب فترة قصيرة من آلة بابين الأشبه باللعبة جاءت مضخة توماس سايفري Thomas Savery ا(1650-1715) الصغيرة (باستطاعة 750 واطاً تقريباً، أو حصان بخاري واحد) تعمل بالبخار من دون مكبس. وبحلول عام 1712 كان نيوكومن Newcomen ا(1664-1729) قد صنع محركاً استطاعته 3.75 كيلو واط لتغذية مضخات المنجم بالطاقة (رولت Rolt ا1963). ونظراً لأن هذا المحرك - الذي يعمل وفق الضغط الجوي - كثف البخار على الجانب السفلي للمكبس، فقد كانت كفاءته جد متدنية حيث وصلت بأحسن حالاتها إلى 0.7% (الشكل 5-2). وبحلول عام 1770 تمكن جون سميتون John Smeaton - الذي أشرنا إلى عمله على الطاقة المقارنة لوسائط التحريك الأساسية في الفصل الرابع - من تحسين تصميم هذه المحركات ومضاعفة كفاءتها المتدنية.



الشكل 5-2

أنموذجان لمحركين بخاريين أحدهما من تصميم نيوكومن والآخر من تصميم واط. الشكل أ. في محرك نيوكومن، الذي صنعه جون سميتون عام 1772، وضع المرجل تحت الأسطوانة، وجرى تكثيف البخار داخل الأسطوانة من خلال حقن الماء من الأنبوب المؤدي إلى جانبه السفلي الأيمن. الشكل ب. في محرك واط، الذي صُنع عام 1788، وُضع المرجل في حيز مغلق منفصل، وغُلفت الأسطوانة بقميص عازل للبخار، كما تم توصيل مكثف منفصل بمضخة هواء للحفاظ على شفط الهواء. مقتبس من فاري (1827).

بدأت محركات نيوكومن بالانتشار في المناجم الإنجليزية في أعقاب 1750، إلا أنه أمكن التسامح مع أدائها الضعيف فقط في حال أمكن تزويدها بالوقود داخل الموقع، ما جعلها غير عملية إن كان نقل الوقود مطلوباً. أما جيمس واط James Watt ا(1736-1819) فقد حصر نيته المتعلقة بإعادة تصميمه الشهير في عنوان براءة الاختراع الخاصة به لعام 1769: طريقة جديدة لتخفيف استهلاك البخار والوقود في محركات الاحتراق (واط 1855 [1769])، حيث مُنحت هذه البراءة

في 25 أبريل 1769، وأوضحت قائمة واط المنهجية الخاصة بالتطورات كيفية اختلاف الآلة عن سابقاتها (مربع 5-3).

لا يخفى على أحد أن المكثفة المنفصلة كانت أهم الابتكارات (الشكل 5-2). وعرض واط فيما بعد محركاً ثنائي الشوط (حيث يعمل البخار في هذا المحرك على تحريك المكبس بشوط باتجاه الأعلى وآخر باتجاه الأسفل) ومنظم طرد مركزي للمحافظة على سرعة ثابتة بوجود أحمال متغايرة. وفي إجراء حديث كلياً، لم يتلق واط وشريكه المالي ماثيو بولتون Matthew Boulton ا(1728-1809) مبلغاً مقابل تسليمهما المحرك، بل مقابل أدائه المحسن قياساً مع محرك نيوكومن. وقد عزز استخراج الفحم والمحركات البخارية تطوير أحدهما الآخر. وكانت الحاجة إلى ضخ كمية أكبر من

مربع 5-3

براءة اختراع واط لعام 1769

نعرض فيما يلي الطريقة التي شرح فيها واط تصميمه المطوَّر:

تعتمد طريقتي في تخفيض استهلاك البخار، وبالتالي تخفيض استهلاك الوقود، في محركات الاحتراق على المبادئ التالية:

أولاً، الوعاء الذي توظف فيه طاقة البخار لتشغيل المحرك، ويسمى الأسطوانة في محركات الاحتراق الشائعة، والذي أسميه وعاء البخار، وهو الوعاء الذي يجب أن يبقى بحرارة البخار نفسه الداخل إليه طوال فترة عمل المحرك...

ثانياً، في المحركات التي ستعمل كلياً أو جزئياً من خلال تكثيف البخار، يجب تكثيف البخار في أوعية منفصلة عن أوعية البخار أو الأسطوانات، رغم اتصالها معاً أحياناً. وأطلق على هذه الأوعية اسم المكثفات، وأثناء عمل المحركات، يجب أن تبقى هذه المكثفات على الأقل ببرودة الهواء نفسه في محيط المحركات وذلك بإضافة الماء أو غيره من المبردات.

ثالثاً، أي هواء أو بخار لا يتكاثف ببرودة المكثفة، وقد يتسبب بإعاقة عمل المحرك، يجب سحبه إلى خارج أوعية البخار أو المكثفات بوساطة مضخات مدمجة مع المحركات نفسها أو خارجية. (واط 1855 [1769]، 2).

المياه من مناجم أعمق سبباً رئيساً لتطوير المحركات البخارية. أما توافر وقود أرخص فأدى إلى انتشار تلك المحركات، وبالتالي إلى توسيع نطاق التعدين. وما هي إلا فترة قصيرة حتى كانت هذه

المحركات تزود آلات التدوير والتهوية بالطاقة أيضاً.

لقد كان محرك واط البخاري المطور بمثابة نجاح تجاري مباشر، وكان من السهولة بمكان التعرف على ما أحدثه من تأثير لاحق على مستوى التصنيع والنقل تجاوز مجرد استخراج الفحم (ثورستون Thurston ا1878؛ دالبي Dalby ا1920؛ فون تونزلمان von Tunzelmann ا1978). وفي الوقت عينه، كان نجاحاً بالقياس مع الإخفاق الصناعي في أواخر القرن الثامن عشر، إذ كان انتشار الآلات المتطورة إجمالاً بحده الأدنى عند قياسه من منظور الإنتاج الإجمالي الحديث. ومع انقضاء فترة تمديد براءة الاختراع الأصلية بحلول عام 1800 والبالغة 25 سنة (وفق قانون المحرك البخاري الصادر عام 1775)، استكملت الشركة التي يملكها واط وبولتون إنتاج نحو 500 محرك، بلغت نسبة المحركات المخصصة لضخ المياه منها 40%. أما متوسط استطاعة المحركات البالغ نحو 20 كيلو واط فكان أعلى بما يزيد على خمسة أضعاف متوسط استطاعة الطواحين المائية الأنموذجية المعاصرة، وأعلى كذلك بنحو ثلاثة أضعاف تلك التي أنتجتها طواحين الهواء.

كانت أكبر وحدات محركات واط (باستطاعة تفوق 100 كيلو واط) تعادل أقوى النواعير الموجودة آنذاك. بيد أن اختيار موقع تلك النواعير لم يتسم بالمرونة، في حين كان بالإمكان اختيار موقع المحركات البخارية بدرجة من الحرية لا تقارن بالنواعير، لاسيما على مقربة من أي ميناء أو على امتداد القنوات المائية، حيث بإمكان وسائط النقل الرخيصة من سفن أو قوارب تزويدها بالوقود اللازم. صحيح أن اختراعات واط ترافقت مع نجاح هذا النمط من المحركات على المستوى الصناعي، إلا أن تمديد براءة اختراعه أعاق ظهور المزيد من الابتكارات. فهل كان واط صاحب العقل النزاع إلى السلامة يخشى استخدام البخار عالي الضغط؟ أو هل حاول منع أي براءات اختراع مماثلة تتزامن مع تمديد براءته؟ إن واط وبولتون كليهما لم يقتصرا على عدم محاولة تطوير النقل باستخدام طاقة البخار فحسب، بل أقنعا وليم موردوك William Murdoch ا(1754-1839)، المسؤول الأول عن تركيب محركاتهما، بعدم تطوير هذه الآلة، ومع إصرار موردوك، حثه بولتون على عدم رفع براءة الاختراع (مربع 5-4).

ولعل ذلك لم يُحدث تغييراً يذكر على مستوى تطور النقل العامل اعتماداً على طاقة البخار مستقبلاً، فحتى أفضل ما يمكن تصوره من العربات التي صنعت عام 1800 كانت ثقيلة جداً، وزاد من صعوبة تقبلها غياب شبه كلي للطرقات المعبدة والقادرة على تحمل حركة المرور الكثيفة. أما الطريقة العملية الوحيدة لتيسير حركتها فكان في وضعها على سكك، وحتى في هذا المقام، استغرق الأمر بضعة عقود بدءاً من استيعاب الفكرة حتى الوصول بها إلى المستوى التجاري، حين أدى انتهاء فترة براءة الاختراع الخاصة بالمخترع واط عام 1800 إلى ظهور فترة مكثفة من الابتكارات. أما التقدم الرئيس الأول فيمثله إدخال ريتشارد تريفيثيك Richard Trevithick ا(1771-1833) لمراجل الضغط العالي في إنجلترا عام 1804، وأوليفر إيفانس Oliver Evans ا(1755-1819) في الولايات المتحدة عام 1805. ومن المعالم الرئيسة أيضاً نذكر تصميم التدفق الواحد الذي أدخله جاكوب بيركينز Jacob Perkins ا(1766-1849) عام 1827، وابتكار جورج هنري كورليس George Henry Corliss ا(1817-1888)

لتعشيقة الصمام المنظم عام 1849، والتطورات الفرنسية لمحركات القاطرات المركبة بعد منتصف سبعينيات القرن التاسع عشر. كما أعطت جملة نماذج وسائط التحريك الأولية الإمكانية لظهور تصاميم خاصة بتنوع كبير (واتكينز 1967).

اتسع نطاق استخدام المحركات التي كانت في الأصل مخصصة لأعمال الضخ والتدوير في المناجم (الشكل 5-3) لتغطي طيفاً واسعاً من التطبيقات الساكنة منها أو المتحركة. ولعل الاستخدام الأبرز بالقياس إلى غيره تمثل في محركات السير الناقل التي وضعت في عدد لا يحصى من المصانع، واستخدامها الذي أحدث ثورة في النقل البري والمائي في القرن التاسع عشر. وتزامن تطور السفن البخارية مع تطور

مربع 5-4

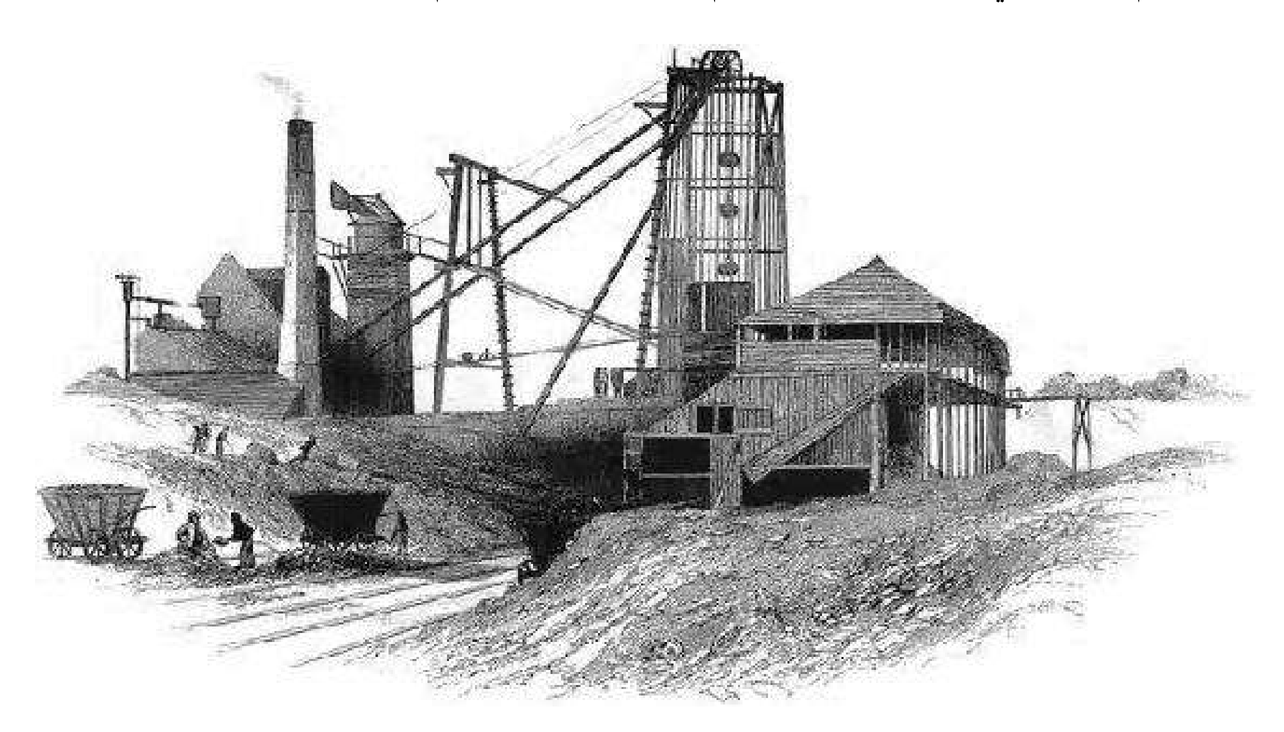
واط وبولتون يؤخران تطور العربة البخارية

في عام 1777حين كان وليم ميردوك في سن 23، مشى لمسافة بلغت قرابة 500 كم إلى برمنجهام كي يحصل على عمل لدى شركة جايمس واط للمحركات البخارية. وقد وجد واط وشريكه ماثيو بولتون في ميردوك شخصاً قيماً. ولعل مهارة بولتون في تركيب الآلات الجديدة عملت على ضمان كفاءة تشغيلها وتحقيق الربح. وبحلول عام 1784 صنع ميردوك أنموذجاً صغيراً لعربة بخارية بثلاث عجلات ومرجل يقع بين العجلتين الخلفيتين. تبعه أنموذج آخر، ما دفع ميردوك إلى اتخاذ قرار في نهاية المطاف بالحصول على براءة اختراع لعربته البخارية (جريفيث 1992).

لكن وفي طريقه إلى لندن للغرض المنشود، وتحديداً في إكستر، اعترضه بولتون الذي أقنعه بالعودة إلى منزله من دون التقدم للحصول على براءة اختراع، حيث رأى أن في إصرار ميردوك كارثة. وجاء فيما كتبه بولتون إلى واط:

قال إنه ذاهب إلى لندن للقاء الرجال، لكني أدركت عاجلاً أنه ذاهب إلى هناك لعرض عربته البخارية والحصول على براءة اختراع. وبعد أن أخبره السيد و. ويلكن ما قاله سادلر وما قرأه بهذا الخصوص في صحيفة سيمينجتونز Simmingtons كان بمثابة النفخة التي أشعلت مجدداً نيران ويمز كافة ودفعته لصناعة العربات البخارية. غير أني تابعت إقناعه للعودة إلى كورنوول من خلال إصراري عليه في الأيام اللاحقة، وفعلاً وصل على أثر ذلك إلى هنا ظهيرة هذا اليوم... أعتقد أني محظوظ بلقائه، كوني متقنعاً بقدرتي على شفائه من اضطرابه، أو بتحويل الشر إلى خير. على الأقل سأمنع الأذى الذي قد يتمخض عن رحلته إلى لندن. (جريفيث 1992، 161).

القاطرات البخارية. فقد بدأ بناء أول القوارب البخارية في سبعينيات القرن الثامن عشر في فرنسا والولايات المتحدة واسكتلندا. إلا أن أول السفن التجارية الناجحة لم تبصر النور إلا عام 1802 في إنجلترا وعرفت باسم تشارلوت دونداس من تصميم المهندس باتريك ميلر؛ بينما ظهرت أول سفينة عام 1807 في الولايات المتحدة باسم كليرمونت من تصميم المهندس روبرت فولتون.



الشكل 5-3

كانت الحفرة «سي» عند بلدة هيبورن كوليري منجماً إنجليزياً أنموذجياً للفحم في مطلع العصر البخاري. أما المحرك البخاري الخاص بالمنجم فقد وضع داخل بناء وزود بالطاقة من خلال آلة التدوير والتهوية. مقتبس من هير Hair ا(1844).

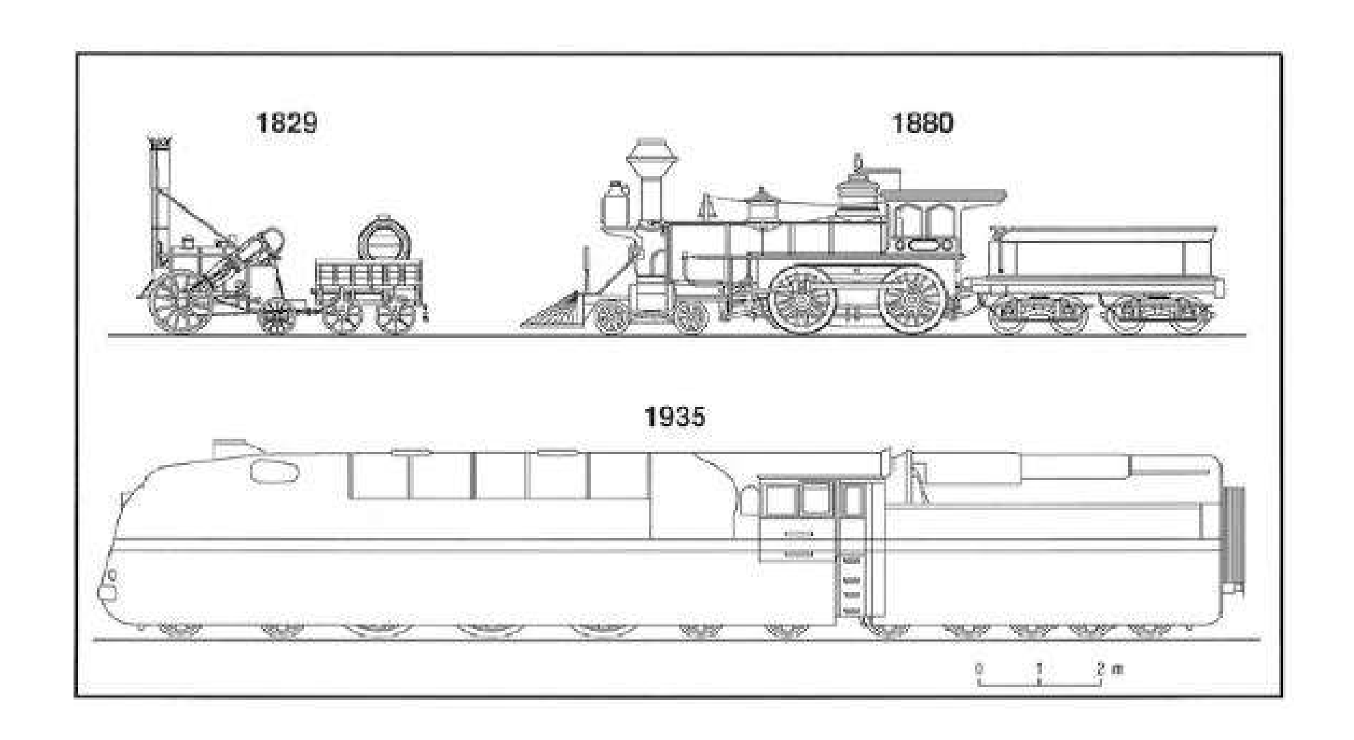
زودت نماذج السفن الأولى كافة التي أبحرت على امتداد النهر بعجلات ذات دواسات (تقع عند مؤخرة السفينة أو منتصفها)، كما كانت مجهزة تجهيزاً كاملاً لتمخر عباب البحار. وكانت أول رحلة عبر الأطلسي بين كيبيك ولندن للسفينة رويال وليم Royal William عام 1833 (فراي Fry ا1896). وبدأت أول رحلة نحو الغرب بسباق بين سفينة الدواسات سيريوس Sirius وغريت وسترن Great Western وهو العام الذي نشر فيه جون إريكسون أول مروحة دافعة أثبتت نجاحها. وشيئاً فشيئاً، بدأت السفن البخارية الكبيرة والسريعة تحل محل السفن الشراعية في نقل البضائع والمسافرين في الرحلات المكتظة عبر شمال الأطلسي، ولاحقاً عبر مسافات طويلة في خطوط وصلت حتى آسيا وأستراليا، حيث نقلت أكثر من 60 مليون مهاجر غادروا القارة بين

عامي 1815 و1930 إلى وجهات خارجية، معظمها إلى أمريكا الشمالية (باينز Baines ا1991). وفي الوقت عينه، باتت السفن العاملة بوقود الفحم عبر المحيط أدوات مهمة في السياسة الخارجية الأمريكية (شولمان Shulman ا2015).

شهد اعتماد النقل البخاري البري بداية بطيئة أيضاً، ثم ما لبث أن تبعه الانتشار السريع للسكك الحديدية. وفي أعقاب تجربة ريتشارد تريفيثيك Richard Trevithick لعام 1804 لآلة تسير على خطوط من الحديد الصب ظهر عدد من السكك الحديدية التابعة للقطاع الخاص. أما أول خط حديدي للقطاع العام، فقد افتتح عام 1830 بين ليفربول ومانشستر، حيث تم جر القطار على هذا الخط بوساطة القاطرة «روكيت» للمهندس جورج ستيفنسون George Stephenson ا(1781-1848). كما جاء انتشار التصاميم الجديدة بمحركات أسرع وأكفأ. وبحلول عام 1900 ظهرت أفضل محركات للقاطرات بضغط زاد على نظيرتها في ثلاثينيات القرن التاسع عشر بخمسة أضعاف، وبكفاءة أعلى بنسبة 12% (دالبي Dalby ا1920). أما السرعة التي تفوق 100 كم/سا فباتت شائعة، وفي ثلاثينيات القرن العشرين وصلت سرعة القاطرات الانسيابية إلى 200 كم/سا بل وأكثر. (الشكل 5-4).

بدأت السكك الحديدية البريطانية بربط مدينتي ليفربول ومانشستر عام 1830 على مسافة 56 كم، لتصل إلى نحو 30.000 كم بحلول عام 1900، في حين بلغ إجمالي طول السكك الحديدية الأوروبية قرابة 250.000 كم. وفي مناطق أخرى من العالم، شهدت السكك الحديدية أكبر توسعاتها في العقود الثلاثة الأخيرة للقرن: بحلول 1900 وصلت طول الشبكة الروسية إلى 53.000 كم (إلا أن الخط الحديدي الممتد عبر سيبيريا إلى المحيط الهادي لم يستكمل سوى عام 1917)، ووصلت شبكة الخطوط الحديدية الأمريكية إلى أكثر من 190.000 كم (بما في ذلك ثلاثة خطوط عابرة للقارة)، أما إجمالي الشبكة حول العالم (بما في ذلك معظم الخطوط الحديدية المتبقية في الهند البريطانية) فوصلت إلى 775.000 كم (وليمز 2006). ولعل اتساع الخطوط الحديدية كان السبب الرئيس وراء الطلب غير المسبوق على الفولاذ الذي شهده النصف الثاني من القرن التاسع عشر.

وبالطبع لاقى هذا المعدن طلباً غير مسبوق من الأسواق الصناعية الناشئة، نذكر منها صناعة الفولاذ عينها (لتوفير المعدن لصناعة الحديد والفولاذ وفق طاقات



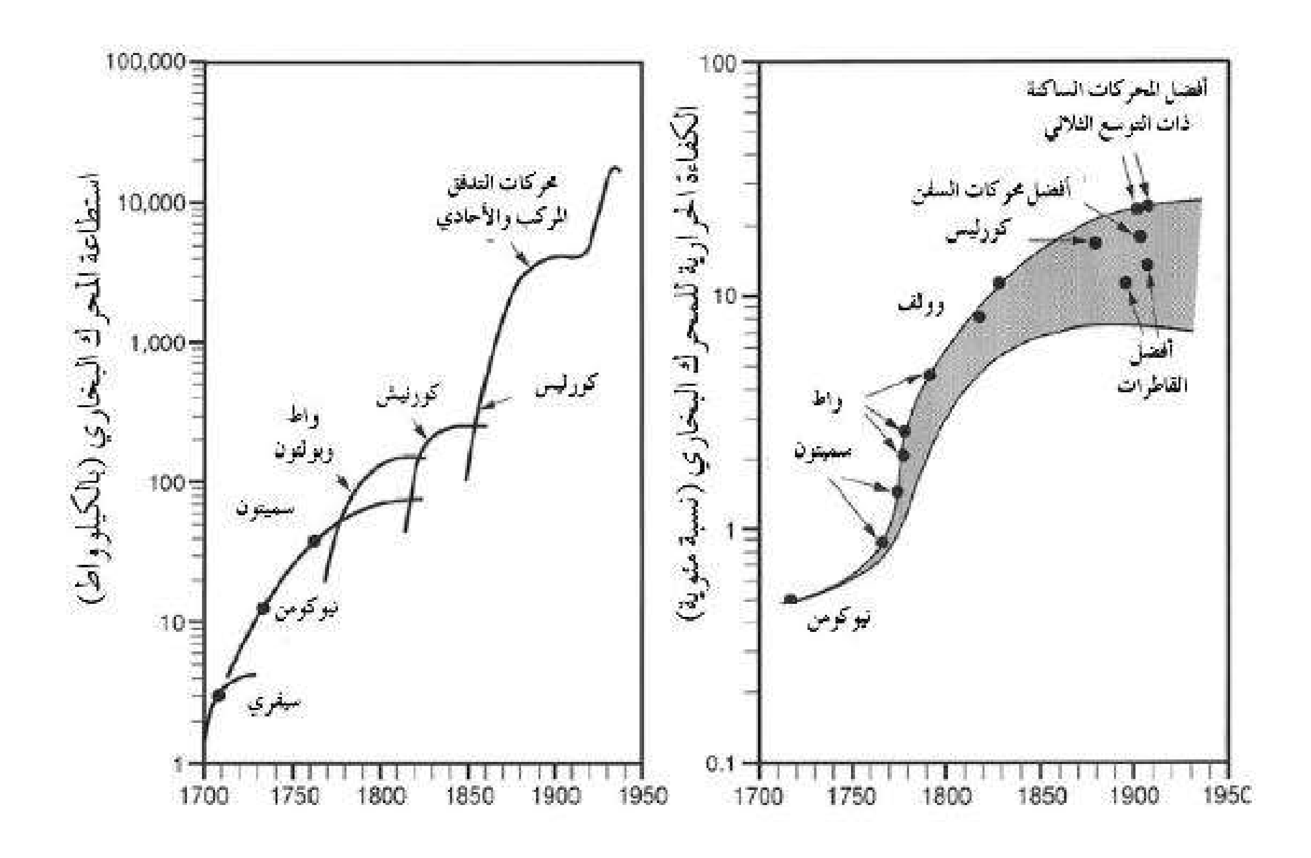
الشكل 4-5

آلات مميزة في عصر القاطرات البخارية. القاطرة «روكيت» للمهندس ستيفنسون عام 1829، هي أول آلية تجارية امتلكت سمتين وُجدتا في كل تصميم لاحق: أسطوانات منفصلة على كل طرف دفعت العجلات بوساطة قضبان رابطة قصيرة، ومرجل كفء متعدد الأنابيب. وقد سيطرت التصاميم الأمريكية القياسية على الخطوط الحديدية الأمريكية منذ منتصف خمسينيات القرن التاسع عشر. ووصل تصميم بورسيج الألماني المُحدث إلى سرعة 191.7 كم/سا عام 1935. تم استقاء البيانات اعتماداً على بيرن Byrn ا(1900) وإليس Ellis ا(1983).

إنتاجية جديدة)، ومن جانب صناعة الكهرباء الجديدة (لإنتاج المراجل والمولدات التوربينية العاملة على البخار، وكذلك لصناعة المحولات وأسلاك الكهرباء)، وفي أعمال استخراج النفط والغاز ونقلهما (لصناعة الأنابيب وقطع الغيار المستخدمة في حفر الآبار وتلبيسها وصناعة الأنابيب والخزانات)، وكذلك في الشحن (لصناعة السفن المكسوة بالفولاذ)، وفي التصنيع (لصناعة الآلات والأدوات والمكونات)، فضلاً عن صناعة النسيج التقليدية وتصنيع الأغذية. إلا أن القضبان (التي كانت سابقاً من الحديد المطاوع) كانت أهم منتج نهائي مصنوع من فولاذ بيسمر Bessemer (لمزيد من المعلومات عنه راجع الفصل السادس) الذي أدخل في أواخر ستينيات القرن التاسع عشر وبقي كذلك طوال القرن (سميل 2016).

بلغ المحرك ذروته بعد أكثر من قرن من حصول واط على براءة اختراع اختراعه المطور. ففي مطلع ثمانينيات القرن التاسع عشر وضع اعتماد هذا المحرك على نطاق واسع أساس الدفع نحو عملية التحول الصناعي الحديث، كما تسبب توافر هذه الطاقة المركزة بتكاليف ميسورة في تغيير إنتاجية التصنيع والنقل لمسافات طويلة براً وبحراً. وقادت هذه التغييرات بدورها إلى موجة تحضر واسعة النطاق، وإلى ظهور بوادر الرخاء ونمو التجارة الدولية، فضلاً عن التحولات التي طرأت على القيادات الوطنية. أما التطورات التقنية التراكمية فكانت ملحوظة، إذ كانت أضخم الآلات المصممة في تسعينيات القرن التاسع عشر أقوى بنحو 30 ضعفاً بالقياس مع تلك المصممة عام 1800 (3 ميغا واط مقابل نحو 100 كيلو واط)، كما كانت كفاءة أفضل الوحدات أعلى بعشرة أضعاف، 25% مقابل 2.5 في المائة (الشكل 5-5). ولعل هذه المكاسب الهائلة على مستوى الأداء والتي تـُرجمت إلى توفير استهلاك الوقود وانخفاض تلوث الهواء بشكل أكبر، جاءت أساساً نتيجة زيادة ضغط التشغيل بمقدار مئة ضعف من 14 كيلو باسكال إلى 1.4 ميغا باسكال.

هذه التطورات، التي اقترنت بملاءمة استخدام المحرك في كثير من أعمال التصنيع والإنشاء والنقل بفضل صلابته وقدرته على التحمل، جعلت من هذه الآلة محركاً أساساً غير حيوي في عملية التحول الصناعي التي شهدها القرن التاسع عشر. أما استخدامات هذا المحرك فتراوحت من مهام نفذتها سابقاً وسائط تحريك أساسية حيوية أو نواعير أو طواحين هواء (لضخ المياه أو نشر الخشب أو طحن الحبوب) إلى تنفيذ مهام جديدة داخل مصانع آخذة في الاتساع (لإمداد محركات السيور الناقلة بالطاقة اللازمة لتشغيل آلات الحفر أو التدوير أو التلميع، وضغط الهواء)، ناهيك عن أن عدداً من أكبر المحركات البخارية التي صنعت استخدم في تدوير المولدات داخل أولى محطات توليد الكهرباء في ثمانينيات وتسعينيات القرن التاسع عشر (سميل 2005).



الشكل 5-5

زيادة الطاقة وتحسن كفاءة أفضل المحركات البخارية الفضلى في الفترة 1700 - 1930. المخطط مقتبس من بيانات ديكنسون Dickinson ا(1939) وفون تونزيلمان von Tunzelmann ا(1978).

أحدثت الاستخدامات المتنقلة للمحرك (تقييم صائب وليس مجرد إطناب) ثورة في عالم النقل البري والمائي على التوازي مع الاتساع السريع للخطوط الحديدية وإطلاق السفن البخارية الجديدة. ومن التطبيقات المتنقلة الأخرى التي سهّلت أداء المهام الشاقة نذكر الروافع البخارية، ومدقات الركائز والحفارات (أول جرافة بخارية حصلت على براءة اختراع عام 1839). ولم يكن لقناة بنما أن تستكمل بسرعة كبيرة (1904-1914) لولا نشر نحو 100 جرافة بخارية ضخمة من جرافات بوسيروس Bucyrus وماريون Marion (ملز 1913؛ برودهيد 2012)، هذا إلى جانب المحركات البخارية التي وجدت طريقها إلى الحقول الأمريكية من خلال استخدامها في محاريث الكابلات.

إلا أن هذه المحركات البخارية وقعت ضحية النجاح الذي حققته، فمع ارتفاع كفاءتها النوعية ووصول استطاعاتها إلى مستوى غير مسبوق (حيث فاقت قوتها قوة أي محرك أساسي تقليدي)، بدأت تواجه عامل المحدودية المتأصل فيها، حيث طُلب من هذه المحركات ما هو أكبر من استطاعتها (سميل 2005). وحتى بعد مضي أكثر من قرن على التطورات، ظلت المحركات البخارية الشائعة بعيدة كل البعد عن الكفاءة، ففي عام 1900 هدرت القاطرة البخارية الأنموذجية 92% من الفحم المغذي لمرجلها. كما حافظت على وزنها الثقيل، الأمر الذي حدّ من استخداماتها في الحركة خارج المياه أو السكك الحديدية، الداعمين لكتلتها (مربع 5-5).

حين وصلت المحركات البخارية إلى كفاءتها واستطاعتها القصوى، بالتزامن مع أدنى نسبة كتلة إلى الاستطاعة، لم تكن هذه الإنجازات العامل الذي فتح الطريق أمام مزيد من هيمنتها. فرغم تطورات هذه المحركات المثيرة للإعجاب ووجودها المطلق مؤخراً في الصناعة وعلى الخطوط الحديدية وفي النقل البحري، إلا أن المحرك الأساس المهيمن في القرن التاسع عشر لم يستطع المحافظة على سمته بوصفه محركاً أساساً رائداً في القرن العشرين. وهنا بدأ توزيع الأدوار، إذ سرعان ما عملت العنفات البخارية على تأمين الطلب على وسائط التحريك الأولية الأقوى في ميدان توليد الكهرباء، بينما وفرت محركات الاحتراق الداخلي (المحركات العاملة بالبنزين أولاً، بدءاً من ثمانينيات القرن التاسع عشر، ومن بعدها محركات الديزل) في نهاية المطاف محركات أساسية اتسمت بخفة وزنها وقوتها وانخفاض سعرها لتوفير الطاقة للنقل البري. ولعل ما ساعد على تنامي استخدام محركات الاحتراق الداخلي توافر أنواع الوقود السائل المكرر من النفط الخام، إذ اتسمت بكثافة طاقتها قياساً بالفحم، ونظافتها عند احتراقها، فضلاً عن سهولة نقلها وتخزينها، ما يشكل توليفة تبقيها متربعة على عرش أفضل أنواع الوقود المستخدم في قطاع النقل.

مربع 5-5

نسبة الكتلة/الاستطاعة في المحركات البخارية العملاقة

تبلغ نسبة الكتلة إلى الاستطاعة لحصان بوزن متوسط يبلغ 750 كغ ويعطي استطاعة قدرها حصان واحد (745 واطاً) أي ما يعادل تقريباً 1.000 غ/واط، وهو ما يكافئ استطاعة رجل بوزن 80 كغ يعمل من دون انقطاع باستطاعة 80 واطاً. كانت أولى المحركات البخارية هائلة الحجم على نحو مفرط، حيث كانت نسبها مرتفعة (600-700 غ/واط) إلى مستوى يعادل نظيرتها في الإنسان وحيوانات الجر. وفي عام 1800 انخفضت نسبة الكتلة/الاستطاعة إلى نحو 500 غ/واط، أما بحلول عام 1900 فقد وصلت نسبة أفضل محرك للقاطرة البخارية إلى مجرد 60 غ/واط. لكن هذا الوزن لا يزال ثقيلاً بالنسبة لتطبيقين مختلفين وأساسين: تغذية المركبات البرية بالطاقة وتدوير مولدات ضخمة في محطات جديدة لتوليد الكهرباء.

في عام 1894 تم تركيب محرك البنزين الجديد دايملر- مايباخ في سيارة فازت بسباق بين باريس وبوردو، حيث بلغت نسبة كتلته إلى استطاعته أقل من 30 غ/واط (بومونت

Beaumont ا1902)، لينحي بالتالي المحركات البخارية العاملة في ميدان النقل على الطرقات البرية. وحتى التصميم التجاري الأول لعنفات تشارلز بارسونز Charles Parsons البخارية الصغيرة - التي صنعت عام 1891 بوحدة استطاعة تبلغ 100 كيلوواط - فلم تتجاوز نسبتها 40 غ/واط، لتنخفض النسبة قبل اندلاع الحرب العالمية الأولى إلى ما من دون 10 غ/واط، بكفاءة تجاوزت 25%، وهي نسبة أعلى من تلك التي حققتها أفضل المحركات البخارية والتي تراوحت بين 11-17% (سميل 2005). وبالتالي كانت محركات ويستينجهاوس كورليس Westinghouse Corliss البخارية الضخمة الستة عشر المركبة في محطة إديسون في نيويورك قد عفا عليها الزمن، وبعد ثلاث سنوات تم تركيب «عملاق عالم المحركات» في محطة غرينتش للترام التابعة لمجلس لندن (ديكنسون 1939، 152)، أول محرك بخاري مركب باستطاعة 3.5 ميغاواط، شغل مساحة كمساحة كاتدرائية. وكان ارتفاع ماكينات غرينتش العملاقة (الذي وصل حتى 14.5 م) بعرضها نفسه، بينما لم يتجاوز عرض مولد بارسون الذي أعطى الاستطاعة عينها 3.35 م، وطوله 4.45 م.

النفط ومحركات الاحتراق الداخلي

تركزت بدايات استخراج النفط الخام واستخدامه على نطاق واسع في بضعة عقود فقط من أواخر القرن التاسع عشر. وما لا شك فيه أن الهيدروكربونات (النفط الخام والغاز الطبيعي) عُرفت جيداً منذ آلاف السنين نتيجة رشحها والبرك القيرية و«الشموع المضيئة» الشائعة بصفة خاصة في منطقة الشرق الأوسط (لاسيما في شمال العراق)، كما في غيرها من المناطق. وجاء في «جدول الممتلكات» المرفق بوصية جورج واشنطن وصف لربيع حارق في وادي نهر كاناواها في غرب فيرجينيا:

> سيطرتُ والجنرال أندرو لويس على المسار الذي كان من ضمنه مساحة 125 فداناً، وذلك لاحتوائه على نبع قيري (بيتوميني) اتسم بقابليته للاشتعال والاحتراق بحرية مثل المواد الكحولية، وبصعوبة إخماده مثلها تقريباً. (أبهام Upham أ1851، 385).

إلا أن استخدام الهيدروكربونات فيما مضى اقتصر بشكل شبه كلي على مواد البناء أو الإكساء الوقائي. وندر استخدامها كوقود احتراق، بما في ذلك تدفئة حمامات القسطنطينية إبان الإمبراطورية الرومانية (فوربز Forbes أ1964). أما الاستثناء الملحوظ فكان حرق الصينيين للغاز الطبيعي لتبخير المياه الملحية في محافظة سيشوان الحبيسة (آدسهيد Adshead أ1992). وأتيحت هذه العملية التي استخدمت منذ مالا يقل عن بداية حكم أسرة هان (200 قبل الميلاد) من خلال اختراع الصينيين للحفر بطريقة الدق (نيدهام Needham أ1964)، حيث كانت قطع

حديدية ثقيلة الوزن مربوطة بكابلات طويلة من الخيزران على رافعات من الخيزران أيضاً ترفع بطريقة إيقاعية عند قفز رجلين إلى ستة رجال على العتلة. أما أعمق حفرة سجلت فكانت بعمق 10 أمتار خلال حكم أسرة هان، لتصل لاحقاً إلى 150 م في القرن العاشر. أما أعمق حفرة فبلغت 1 كم في بئر زينهياي عام 1835 (فوجل Vogel أ1993). كما استخدم الغاز الطبيعي، الذي ينقل بوساطة أنابيب الخيزران، في تبخير المياه الملحية في أحواض ضخمة مصنوعة من الحديد الصب.

بقيت هذه الممارسة الصينية معزولة عن العالم الذي تعين عليه الانتظار لألفي عام أخرى قبل ظهور عصر الهيدروكربونات ثانية على المستوى العالمي. ففي أمريكا الشمالية، جُمع النفط من الرشح الطبيعي في غربي بنسلفانيا في أواخر القرن الثامن عشر وبيع كنفط سينيكا الطبي، وفي فرنسا، استثمر الرمل النفطي منذ 1745 في ألسايس، بالقرب من ميركفيلر - بيكيلبرون، حيث بنيت أول مصفاة صغيرة عام 1857 (فالتر Walther أ2007). إلا أنه كان ثمة موقع واحد فقط في العالم ما قبل العصر الصناعي اتسم بتاريخ طويل على مستوى جمع النفط الخام، ألا وهو شبه جزيرة أبشيرون في باكو المطلة على بحر قزوين أو فيما يعرف اليوم بأذربيجان.

ورد وصف أحواض النفط وآبار النفط الخاصة بالمنطقة في مصادر العصور الوسطى، حيث يدل أحد النقوش عام 1593 على بئر بعمق 45 م حفر يدوياً في بلخاني (مير بابايف Mir-Babaev أ2004). وبحلول عام 1806 إبان حكم روسيا القيصرية، كان لدى شبه جزيرة أبشيرون الكثير من الآبار الضحلة التي جُمع منها النفط وقُطر لإنتاج الكيروسين المستخدم في الإنارة المحلية والتصدير بوساطة الإبل في حقائب جلدية وبراميل خشبية. وبني الروس أول معمل تجاري لتقطير النفط عام 1837 في بلخاني، وفي عام 1846 نزلوا إلى أول بئر نفطية استكشافية في العالم (بعمق 21 م) في بيبي هيبات، ليبدأ استثمار أحد أضخم حقول النفط في العالم والذي لا يزال منتجاً حتى يومنا هذا.

ولعل التاريخ الغربي المتعلق بصناعة النفط إما حذف التطورات التي ظهرت في باكو أو اقتصر على ذكرها فقط بعد وصف بدايات صناعة النفط الأمريكية في بنسلفانيا. ويذكر أن ما شجع الأمريكان على التنقيب عن النفط كانت رغبتهم في إيجاد بديل عن زيت الحوت الباهظ المصنوع من شحم حوت العنبر الذي ينقل على ظهر السفن ويحرق في المصابيح (برانتلي Brantly أ1971). إذ كان لدى الأمريكان أكبر أسطول لصيد الحيتان في العالم، حيث تجاوز العدد الأقصى لسفنه عام 1846 700 سفينة. وفي مطلع أربعينيات القرن التاسع عشر، تمكن البحارة كل عام من إحضار نحو 160.000 برميل من زيت العنبر إلى موانئ نيو إنجلاند (ستاربك Starbuck أ1878؛ فرانسيس Francis أ1990).

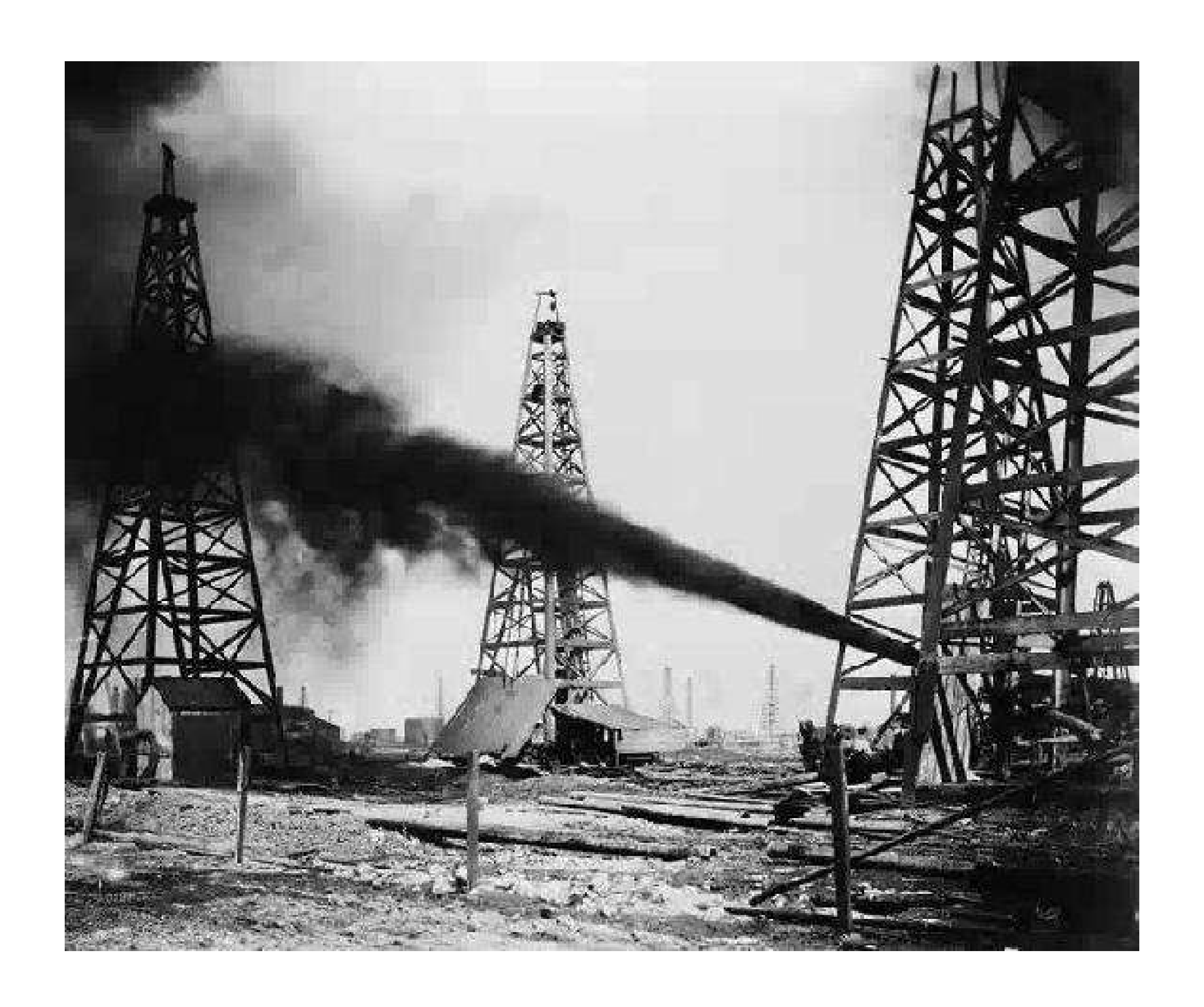
إلا أن أول بئر حفرت يدوياً في أمريكا الشمالية كانت في كندا عام 1858 من قبل تشارلز تريب وجايمس وليامز بالقرب من بلاك كريك في مقاطعة لامبتون الواقعة جنوب غرب أونتاريو، ليسطِّر بذلك أول ازدهار للنفط على مستوى العالم، حيث تم إثر ذلك تغيير اسم القرية إلى «ينابيع النفط» (بوت Bott أ2004). وكانت أول بئر محفورة بطريقة الثقب بدلاً من طريقة الحفر التقليدية، والتي ورد ذكرها في كل ما يتعلق بتاريخ إنتاج النفط، قد استكملت بإشراف إدوين درايك

Edwin Drake أ(1819-1880)، وهو ناظر قطارات سابق وظفه جورج هنري بيسل George Henry Bissell أ(1821-1884) مؤسس شركة بنسلفانيا للنفط الصخري (ديكي Dickey أ1959). فقد شهد موقع البئر رشحاً نفطياً في منطقة أويل كريك بالقرب من تيتوسفيل، بنسلفانيا، حيث لامست الحفارات النفط على عمق 21 متراً بتاريخ 27 أغسطس/آب 1859، التاريخ الذي اعتبر بداية العصر النفطي الحديث. واستكملت المهمة بطريقة الحفر الإيقاعي التي استخدم فيها محرك بخاري صغير.

في ستينيات القرن التاسع عشر، شهدت ثلاثة بلدان - الولايات المتحدة وكندا وروسيا - صناعات نفطية جديدة ومتنامية. فقد سجل الإنتاج الكندي ارتفاعاً مؤقتاً مع أول بئر متدفقة على مستوى العالم في منطقة «ينابيع النفط» Oil Springs في عام 1862 ومع الاكتشافات الجديدة في بيتروليا المجاورة عام 1865، لكن بات إنتاجها مهملاً قبل وصول القرن إلى نهايته بفترة لابأس بها، حيث لم تنضم كندا مجدداً إلى مصاف منتجي النفط الرياديين إلا بعد أن وضعت الحرب العالمية الثانية أوزارها مع اكتشاف حقول نفط عملاقة في ألبيرتا. بالمقابل، واصل الإنتاج الأمريكي ارتفاعه، وذلك بداية من العديد من الحقول الصغيرة داخل حوض أبالاتشيان (من نيويورك عبر بنسلفانيا إلى فرجينيا الغربية)، ليبدأ لاحقاً في كاليفورنيا عام 1865. وبدأ استخراج النفط من حوض لوس أنجلوس عام 1880 ومن حوض سان خواكين عام 1891 (حيث استمر حقلا ميدواي صن ست ونهر كيرن العملاقان في هذا الحوض بإنتاج النفط لأكثر من قرن بعد تلك الفترة) وفي مقاطعة سانتا باربارا بعد عام 1890 (بما في ذلك أول آبار بحرية حفرت من أرصفة خشبية).

انضمت كنساس إلى الولايات المنتجة للنفط عام 1892، ثم لحقت بها تكساس (حقل كورسيكانا) عام 1894، وأوكلاهوما عام 1897، وفي عام 1901 قام أنتوني فرانسيس لوكاس باكتشاف باهر لحقل سبيندلتوب الواقع على مقربة من بيومونت جنوبي تكساس الذي احتوى على بئر متدفقة أنتجت 100.000 برميل/اليوم بتاريخ 10 يناير/كانون الثاني 1901 (لينسلي Linsley ورينسترا Rienstra وستايل Stiles أ2002؛ الشكل 5-6). أما صناعة النفط الروسية الناشئة فقد حظيت بكثير من الاستثمارات الخارجية، لاسيما من لودفيج Ludwig وروبرت نوبل Robert Nobel من خلال شركة الأخوين نوبل للبترول التي أبصرت النور عام 1875، وكذلك من جمعية الأخوين روتشايلد لصناعة وتجارة النفط في منطقة قزوين والبحر الأسود، والتي أسست عام 1883. وبحلول عام 1890 تجاوز إنتاج روسيا من النفط المستخدم في الطاقة نظيره من الفحم، وفي عام 1899 وقبل اكتشاف النفط في جنوب تكساس، أمست أكبر منتج للنفط الخام على مستوى العالم لفترة قصيرة بكمية تزيد على 9 ملايين طن/العام (صمدوف Samedov أ1988)، حيث صُدّر معظم الوقود المذكور من قبل مستثمرين أجانب. وبدأ إنتاج باكو يشهد تراجعاً بعد عام 1900، وبحلول 1913 ازداد استهلاك روسيا من الفحم إلى أكثر من ضعفي قيمته ليصل إلى مصاف استهلاكها من النفط. أما الاكتشافات الرئيسة الأخرى للنفط في الفترة التي سبقت عام 1900، فقد شوهدت في رومانيا وإندونيسيا (سومطرة عام 1883) وبورما (التي بدأ الإنتاج فيها عام 1887)، في حين انضمت المكسيك إلى مصاف منتجي النفط عام

1901؛ وفي عام 1908 ظهر أول اكتشاف مهم في منطقة الشرق الأوسط في مسجد السليمان بإيران؛ أما نفط ترينيداد فقد أنتج لأول مرة عام 1913؛ في حين بدأ حقل مينة جراند الضخم



الشكل 5-6

تدفق النفط من بئر سبيندلتوب بالقرب من بيومونت، تكساس، يناير/كانون الثاني 1901 (Corbis).

عند شاطئ بحيرة ماراكايبو في فنزويلا إنتاجه عام 1914.

كان جلّ هذه الاكتشافات حقولاً هيدروكربونية احتوت على نفط خام وما يرتبط به من غاز طبيعي، إلا أن استخدام الغاز كان نادراً في العقود الأولى من صناعة الهيدروكربونات، إذ لم يكن بالإمكان نقله عبر مسافات طويلة في غياب الضواغط والأنابيب الفولاذية نظراً لسهولة تبخره. بالمقابل، عملت الطاقة عالية الكثافة التي وفرتها أنواع الوقود السائل الناتجة عن تكرير النفط الخام (البنزين والكيروسين وزيوت الوقود) وسهولة نقلها على جعلها مصدر طاقة متفوقة على مستوى النقل، في حين فتح اكتشاف محرك الاحتراق الداخلي واعتماده بشكل سريع الباب أمام سوق جديدة ضخمة لاستخدام تلك الأنواع.

كانت الغاية من استخراج النفط الخام إنتاج مصدر للطاقة بتكلفة يسيرة من أجل الإنارة، لكن بعد أقل من 25 عاماً من بداية استخراجه في الولايات المتحدة، بدأ توليد الكهرباء تجارياً واستخدامها المصابيح (انظر القسم التالي) بطرح بديلٍ متفوق. فمع اتساع نطاق استخراج النفط في ستينيات القرن التاسع عشر لم تكن محركات الاحتراق الداخلي التجارية قادرة على تزويد المركبات بالطاقة، لكن ومرة أخرى خلال 25 عاماً تقريباً، تمكن مهندسان ألمانيان من صنع أول محرك عملي للسيارات وبالتالي ظهر طلب جديد على الوقود شهد ذروته على مستوى العالم بعد نحو 130 عاماً.

بدأ محرك الاحتراق الداخلي، المحرك الأساسي الجديد الذي يحرق الوقود الوارد إليه داخل أسطوانة، يشهد تطورات سريعة. ووصلت التصاميم إلى كمالها في الجيل الأول من استخدامها التجاري، وذلك بين عامي 1886 و1905، لتبقى من دون تغيير يذكر (رغم تحسينها بشكل كبير) لسائر القرن العشرين (سميل 2005). وعقب عقود عديدة من التجارب التي باءت بالفشل والتصاميم التي أقصيت، حصل أول محرك احتراق داخلي ناجح تجارياً على براءة الاختراع عام 1860 من قبل جان جوزيف إيتين لينوار Jean Joseph Étienne Lenoir أ(1822-1900). إلا أن هذا المحرك لم يكن ملائماً البتة للاستخدام المتنقل، إذ كان عبارة عن ماكينة أفقية تعمل بشكل مزدوج وتحرق خليطاً من غاز مضيء وهواء غير مضغوط يتم إشعاله عن طريق شرارة، بكفاءة لم تتجاوز 4% (سميل 2005).

وفي عام 1862، وضع ألفونس يوجين باو (باو دي روكا Beau de Rochas، أ1815-1893) مفهوماً لمحرك رباعي الشوط، لكن الأمر استغرق 15 سنة أخرى قبل أن يحصل نيكولاس أوغست أوتو Nicolaus August Otto أ(1832-1891) على براءة اختراع خاصة بهذا المحرك، وذلك عام 1877، ليبيع على أثر ذلك قرابة 50.000 وحدة (باستطاعة 6 كيلو واط وبنسبة ضغط اقتصرت على 2.6) إلى ورشات صغيرة لم تملك سبيلاً إلى تغطية تكاليف شراء محرك بخاري (كليرك Clerk أ1909). إلا أن هذا المحرك البطيء الذي اعتمد على وقود غاز الفحم لم يكن محركاً أساسياً في النقل. والمحرك المذكور كان من تصميم جوتليب دايملر Gottlieb Daimler أ(1834-1900)، موظف سابق لدى شركة أوتو، وفيلهيلم مايباخ Wilhelm Maybach أ(1846-1929) لحرق البنزين في ورشتيهما بمدينة شتوتغارت (فالز Walz ونيمان Niemann أ1997). أما كثافة الطاقة التي يعطيها البنزين فتبلغ 33 ميغا جول/

ل (أي نحو 1.600 ضعف غاز المدينة الذي استخدمه أوتو) مع نقطة وميض منخفضة جداً (-40 سلزيوس) ما يجعل إشعال المحرك سهلاً.

بنى دايملر ومايباخ الأنموذج الأولي عام 1883. وفي نوفمبر/تشرين الثاني 1885 استخدما نسخة لاحقة للأنموذج الأولي، وهو محرك مبرد بالهواء لمد أول دراجة نارية في العالم بالطاقة. وفي مارس/آذار 1884، تم تركيب تصميمهما الأكبر الذي يعتمد على تبريد الماء (بسعة 0.462 ل واستطاعة 820 واطاً)، وبعدد دورات وصلت إلى 600 دورة في الدقيقة على عربة خشبية العجلات (فالز ونيمان 1997). وبالتزامن مع ذلك، صمم كارل فريدريك بنز (1844- 1929) الذي كان يعمل في مانهايم التي تبعد نحو 120 كم شمال شتوتغارت، أول محرك ثنائي الشوط يعمل بالبنزين عام 1883، ومن ثم صمم محركاً رباعي الشوط بعد انقضاء فترة حماية براءة الاختراع الخاصة بأوتو، حيث حصل على براءة اختراع خاصة به في يناير/كانون الثاني 1886. وقام بتركيب محرك باستطاعة 500 واط و250 دورة في الدقيقة على هيكل ثلاثي العجلات وعرض المركبة للعموم في الثالث من يوليو/تموز 1886. وقدمت توليفة محرك الدوران المرتفع لدايملر والإشعال الكهربائي لبنز ومكربن التغذية بالعوامة لفيلهيلم مايباخ المكونات الأساسية للمركبات الحديثة التي تسير على الطرقات، ليصمم المصنع الألماني الرائد أول سيارة أساسية مع انطلاقة القرن الجديد (مربع 5-6، الشكل 5-7).

لعل شركة دايملر للمحركات جسدت النوعية الأعلى للسيارات، لكن مع بداية القرن العشرين تميزت في تركيزها على سوق الترف. وبعد عقدين من أول ظهور

مربع 5-6

أولى السيارات الحديثة

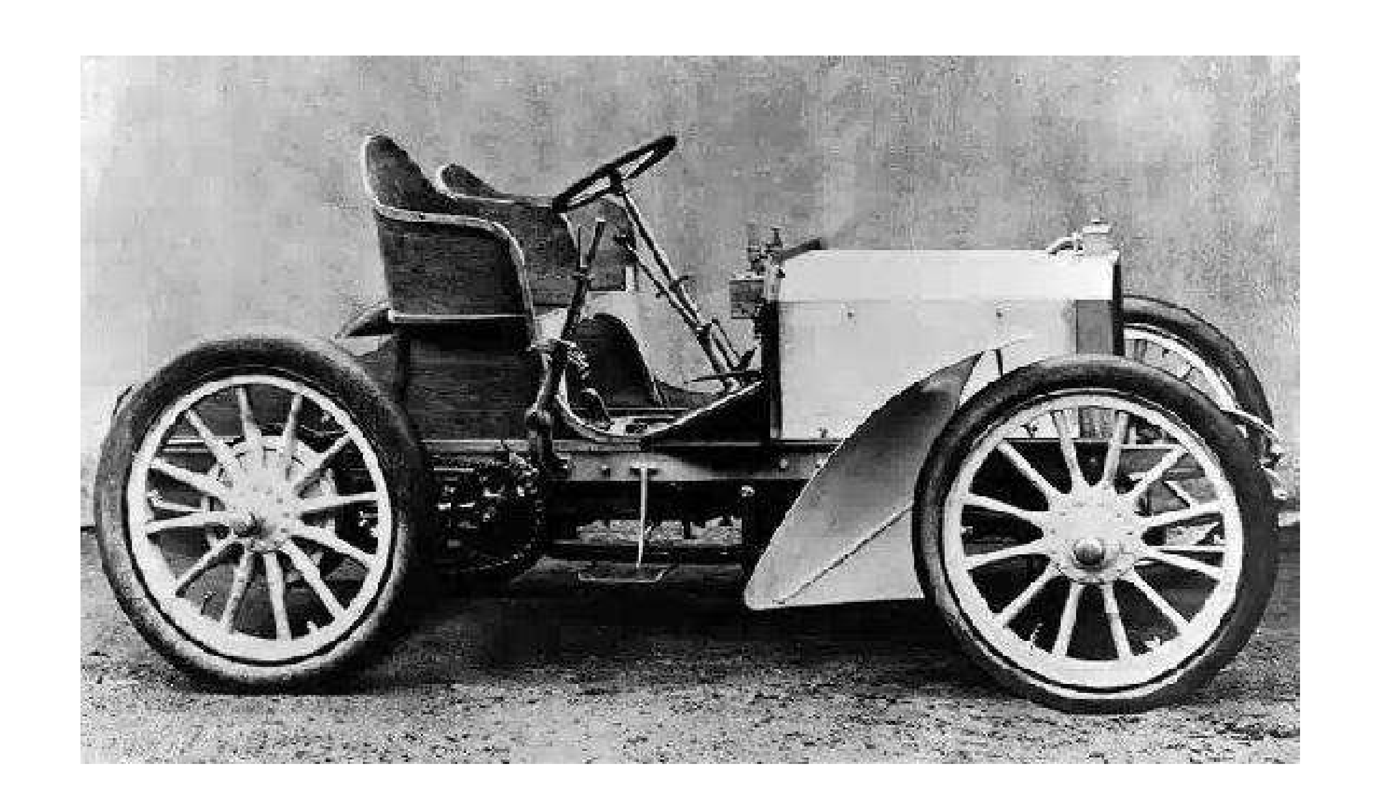
السيارة اختراع ألماني، إلا أن المهندس الفرنسي إميل ليفاسور (1844-1897) صمم أول مركبة لم تقتصر على كونها عربة لا تجرها الخيل، رغم احتوائها على أفضل محرك ألماني. وفي عام 1891، عرضت شركة دايملر للمحركات DMG أ(Daimler Motoren Gesselschaft) على ليفاسور Levassor المحرك الألماني بشكل حرف V، ليقوم هذا الأخير بتصميم هيكل جديد للسيارة يثبت فيه هذا المحرك. وفي تسعينيات القرن التاسع عشر، حافظت السيارات ذات محركات DMG على فوزها في سباقات السيارات الأوروبية، إلا أن السيارة الصانعة للتاريخ من إنتاج هذه الشركة كانت ذات منشأ تجاري بحت (روبسون Robson أ1983؛ أدلر Adler أ2006). وعندما أسس إميل جيلينيك Emil Jellinek أ(1853-1918)، رجل الأعمال والقنصل العام النمساوي-الهنغاري في موناكو، وكالة لسيارات دايملر في الثاني من أبريل/نيسان 1900، قام بطلب 36 مركبة، ليضاعف عدد الطلبية بعد فترة وجيزة. ومقابل هذه الطلبية الضخمة، طالب بحقوق بيع حصري في الإمبراطورية النمساوية-

الهنغارية وفرنسا وبلجيكا والولايات المتحدة، وأن تحمل السيارات العلامة التجارية «مرسيدس»، تيمناً باسم ابنته.

ولتأمين هذه الطلبية الفريدة، صممت شركة مايباخ سيارة وصفتها الشركة التي خلفتها - مرسيدس- بنز - بأنها أول سيارة حقيقية وأطلق عليها «أول سيارة حديثة تحتوي على الأساسيات كافة» (فلينك Flink أ1988، 33). واعتبر طراز مرسيدس 35 سيارة سباق، حيث كانت السيارة ذات مظهر جانبي متطاول، مع مركز جاذبية منخفض جداً، وبوزن 1.200 كغ. وكان للسيارة محرك رباعي الشوط جبار على نحو استثنائي (آنذاك) (5.9 لتر، 26 كيلو واط، أو 35 حصاناً، 950 دورة في الدقيقة) مع مكربنين وصمامات إدخال تعمل آليا. وخفضت مايباخ وزن المحرك إلى مجرد 230 كغ باستخدام كتلة ألمنيوم، مع تخفيض نسبة كتلة المحرك إلى استطاعته إلى ما من دون 9غ/واط، أي أدنى بنسبة 70 في المائة قياساً بأفضل محرك DMG صنع عام 1895. وسرعان ما سجلت السيارة الجديدة الرقم القياسي العالمي للسرعة (64.4 كم/سا)، لتلحق بها سيارة مرسيدس 60 الأقوى والأجمل عام 1903، ما مثل بداية العربات المتنقلة التي لم تفقد سوى القليل من جاذبيتها بعد 125 عاماً.

للسيارة الألمانية في منتصف ثمانينيات القرن التاسع عشر، بقيت سيارة الركاب مركبة باهظة الثمن، تصنع بأعداد قليلة وفق طرائق إنتاج حرفية. أما السيارات الأمريكية فلم تتسم بصفات خاصة، حيث ذكر خبير سيارات بريطاني رائد عام 1906 أن «التطور الذي طرأ على تصميم وتصنيع المركبات ذات المحركات في أمريكا لم يتميز بأي تقدم ملحوظ على مستوى هذه الممارسة سواء في البلد المذكور أم على امتداد القارة» (بياومونت Beaumont أ1906، 268). إلا أن هذه النظرة تغيرت كلياً بعد عامين عندما أدخل هنري فورد (1863-1947) الطراز T للسيارة التي أنتجت بكميات كبيرة وبتكلفة ميسورة، وبنوعية تفي بصرامة الطريقة الأمريكية في القيادة، حيث نورد شرحاً لهذا الإنجاز وإرثه في الفصل التالي.

ويلبر Wilbur أ(1867-1912) وأورفيل رايت Orville Wright أ(1871-1948)، رائدان بعيدان عن التوقعات، وصانعا دراجات من دايتون، هما أول من ابتكر تزويد أول عملية طيران ناجحة بالطاقة باستخدام محرك احتراق داخلي خفيف، وذلك



الشكل 7-5

سيارة مرسيدس 35 من تصميم فيلهيلم مايباخ وباول دايملر عام 1901. الصورة من الموقع الإلكتروني لشركة دايملر.

عندما ارتفعت طائرتهما لفترة قصيرة فوق الكثبان في كيتي هوك بولاية كارولاينا الشمالية بتاريخ 17 ديسمبر/كانون الأول 1903 (مكالا 2015). لكنهما لم يكونا أول من قام بهذه المحاولة. إذ قبل تسعة أيام فقط من طيرانهما الناجح، قام تشالز مانلي Charles M. Manly بثاني محاولة له لإطلاق *Aerodrome A* باستخدام منجنيق موضوع على أحد المراكب في نهر بوتوماك. أما الطائرة فقد صنعت اعتماداً على منحة حكومية تلقاها صموئيل بيربوينت لانجلي Samuel Pierpoint Langley أ(1834-1906)، سكرتير معهد سيمثونيان، وكانت مجهزة بمحرك شعاعي قوي خماسي الأسطوانات (39 كيلوواط، 950 دورة في الدقيقة). إلا أن الطائرة سرعان ما غاصت في الماء عند المحاولة الأولى لمانلي في 7 أكتوبر/تشرين الأول 1903.

ما سبب نجاح الأخوين رايت؟ ولمَ قاما بذلك بعد أقل من خمس سنوات من كتابتهما إلى معهد سيمثونيان لطلب معلومات حول الطيران- ودونما سابق معرفة؟ فبعد تلقيهما رفض مصنعي المحركات صناعة محرك يفي بالمواصفات التي رغبا بها، عمدا إلى تصميمه بنفسيهما، ليقوم الميكانيكي تشارلز تايلور الذي يتعاملان معه بتصنيعه في فترة لم تتجاوز ستة أسابيع. وصنع

هيكل المحرك من الألمنيوم ولم يكن مزوداً بمكربن ولا بشمعات احتراق، إلا أن أسطواناته الأربع أزاحت 3.29 ل وأعطت استطاعة مقدارها 6 كيلوواط (جستون Gunston أ1986). لكن المحرك الذي كان بوزن 91 كغ أعطى بعد استكمال تصنيعه استطاعة فعلية وصلت حتى 12 كيلوواط خلال الطيران، وبلغت نسبة الكتلة/الاستطاعة 7.6 غ/واط. إلا أن هذا المحرك الخفيف والجبار كان مجرد واحد من مكونات هذا النجاح. فقد درس الأخوان علم ديناميكية الهواء وفهما أهمية التوازن والاستقرار والتحكم في أثناء الطيران، حيث أوجدا حلاً لهذا التحدي في طائرتهما الشراعية عام 1902 (جاكاب Jakab أ1990). وجمعا ما بين خبرتهما في الهندسة مع الاختبارات الصارمة والمنتظمة لأشكال الجنيحات الرافعة والجناح، وتجربتهم مع الطيران الشراعي. وثمة توثيق جيد لأولى محاولات طيرانهما بتاريخ 17 ديسمبر/كانون الأول 1903 (مربع 5-7، الشكل 5-8).

إلا أن براءة الاختراع (الولايات المتحدة 821.393) لم تمنح حتى مايو/أيار 1906، وتعرضت لانتهاكات واسعة النطاق نظراً لبدء المصممين في كثير من البلدان بتصنيع طائراتهم. كما أحرز تقدم سريع على مستوى التحكم بالطيران ومدته. وبتاريخ 20 سبتمبر/أيلول 1904، طار الأخوان رايت في أول دورة كاملة لهما، ليتمكنا بتاريخ 9

مربع 5-7

أولى رحلات الطيران

بعد تسعة أيام من السقوط الثاني لمانلي في المياه، كان الأخوان رايت على استعداد لاختبار طائرة Flyer من مصنع كيتي هوك. واتسمت هذه الطائرة بهشاشتها، وكانت ثنائية الجناح ومتقدمة الذيل (ذيلها أمام أجنحتها)، مصنوعة من إطار خشبي مغطى بقماش قطني ناعم. بلغ طول جناحها 12 م، ولم يتجاوز وزنها 283 كغ. وكان محرك السلسلة المسننة يعطي الطاقة اللازمة لتدوير مروحتين باتجاهين متعاكسين. في أول محاولة طيران، قرابة الساعة 10:35 صباحاً، كان أورفيل، الطيار، منبطحاً فوق الجناح السفلي ويقوم بالتوجيه بتحريك حامل مربوط بأسلاك موصولة بالأجنحة ودفة القيادة. وكانت محاولة الطيران الأولى أشبه بقفزة لمسافة 37 م، حلق خلالها الطيار في الجو لمدة 12 ثانية فقط.

أما محاولة الطيران الثانية، والتي نفذت بعد إصلاح الأضرار الناجمة عن الانزلاق أثناء الهبوط الأول، فقطعت مسافة 53 م، والثالثة 61 م. لكن في المحاولة الرابعة، بدأت الطائرة بالتأرجح باتجاه الأعلى والأسفل قبل أن يتمكن ويلبر من استعادة التحكم بها، لكنها هوت فجأة في أثناء هبوطها ليُكسر إثر هذا الاصطدام إطار دفتها الأمامي، لكن بعد أن بقيت في الجو لمدة 57 ثانية وقطعت مسافة 260 م. وقبل الشروع برحلة العودة إلى دايتون، أرسل الأخوان رايت برقية إلى أبيهما ميلتون رايت الموقر: «نجحنا في أربع محاولات طيران يوم الخميس صباحاً وجميعها كانت في مواجهة ريح بسرعة 21 ميلاً. بدأنا من الأرض بقوة المحرك وحدها. متوسط سرعة الطيران 31 ميلاً. أطول فترة بلغت 57 ثانية. أبلغ الصحافة. سنكون في البيت في عيد الميلاد». (المكتبة الرقمية العالمية 2014).

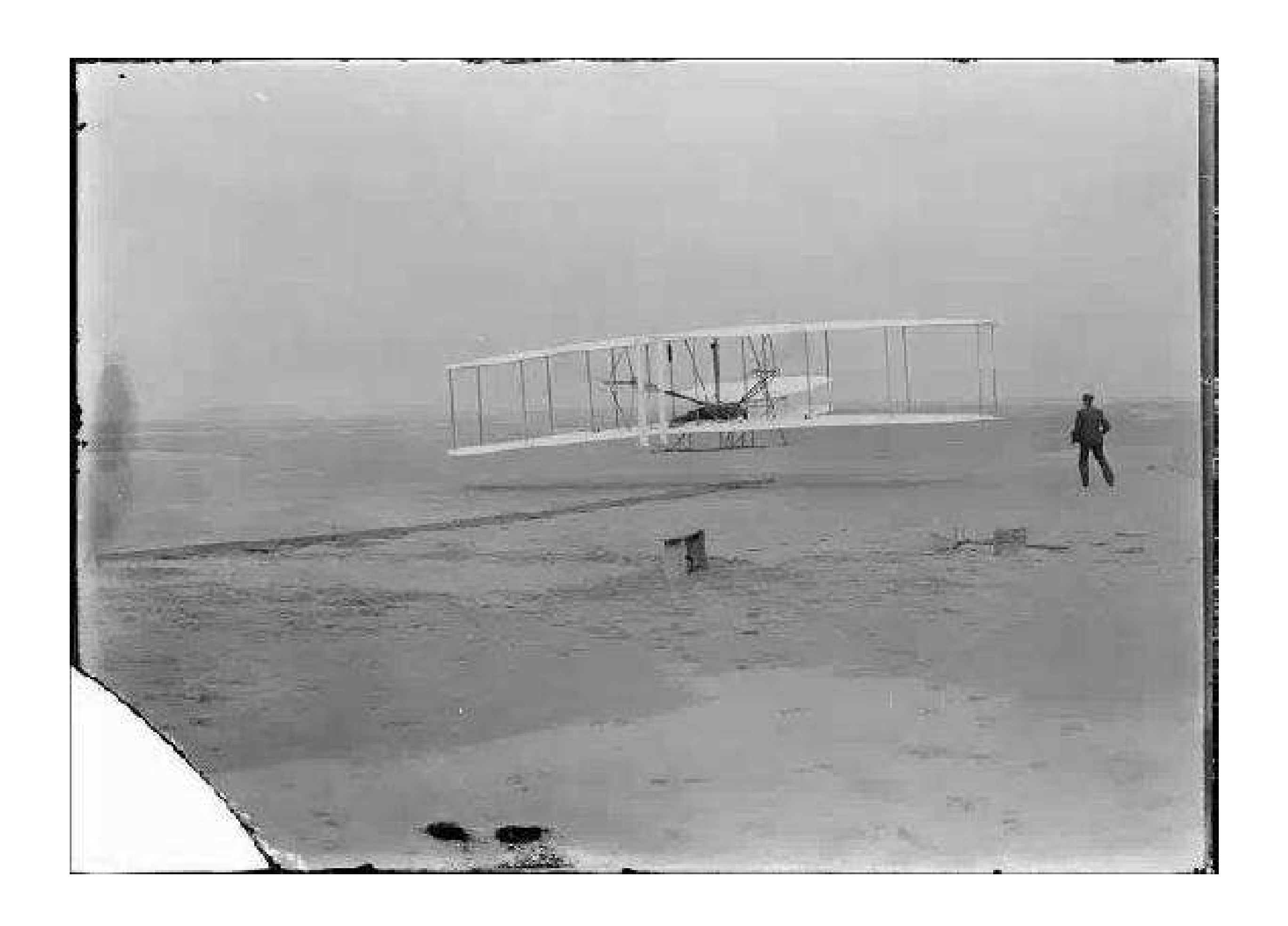
نوفمبر/تشرين الثاني 1904 من قطع مسافة ثلاثة أميال (مكالا McCullough أ2015). وبعد أقل من خمس سنوات، وعقب فترة اشتداد حمى التنافس الدولي، استطاع لويس تشارلز جوزيف بليرويت (1872-1936) الذي صنع سابقاً أول طائرة أحادية الجناح في العالم، عبور القناة الإنجليزية لأول مرة بتاريخ 25 يوليو/تموز 1909 (بليريو Blériot أ2015)، وفي عام 1914

بدأت القوى الجوية تتشكل لدى القوى العظمى، حيث انتشرت واتسعت إبان الحرب العالمية الأولى.

حين كانت محركات شرارة البنزين في طريقها إلى تحقيق النجاح التجاري، أدخلت طريقة مختلفة تماماً لإشعال الوقود إثر اختراع رودولف ديزل Rudolf Diesel أ(1858-1913) الذي حصل بموجبه على براءة الاختراع عام 1892 (ديزل Diesel أ1913). ففي محركات الديزل، يتم إشعال الوقود المحقون داخل الأسطوانة بشكل تلقائي بسبب درجات الحرارة المرتفعة التي تولدها نسب الضغط البالغة 14-24 بالمقارنة مع 7-10 فقط في محركات دورة البنزين الخاصة بـ «أوتو». وهذا يتطلب كتلة أعلى للمحرك مقابل سرعة أقل، إلا أن محركات الديزل تتسم بكفاءة أكبر من محركات البنزين. فحتى عند أولى اختبارات اعتماد المحرك في فبراير/شباط 1897، تجاوزت كفاءة الأنموذج الأولي 25% (مقارنة بنسبة 14-17% لأفضل محركات البنزين آنذاك). وبحلول عام 1911 وصلت درجة الكفاءة 41%، لتصل نسبة أفضل محركات الديزل الضخمة إلى أكثر من 50%، وهي ضعفا كفاءة محركات البنزين (سميل 2010ب). أضف إلى ذلك أن محركات الديزل تستخدم وقوداً أثقل وأرخص ثمناً. فالديزل أثقل بنحو 14% من البنزين (820-850 غ/ل مقابل 720-750 غ/ل) مع تشابه في كثافة الطاقة وفق الكتلة، ما يعني أن كثافة الطاقة التي يعطيها محرك الديزل في الحجم أعلى بنسبة نحو 12% وتعادل تقريباً 36 ميغا جول/ل.

كان ديزل قد عزم على تصميم محرك احتراق داخلي أكفأ خلال دراساته الجامعية، وفي ديسمبر/ كانون الأول 1892، نال أخيراً براءة الاختراع (بعد رفضها مرتين)

يوصَف محرك الاحتراق الداخلي بأنه يتم داخل أسطوانة مملوءة بهواء نقي...



الشكل 8-5

أول محاولة طيران بطائرة ذاتية الاندفاع أثقل من الهواء في أراضي شركة كيتي هوك بولاية كارولاينا الشمالية، الساعة 10:35 صباحاً، بتاريخ 17 ديسمبر/كانون الأول 1903، حيث تولى خلالها أورفيل رايت التحكم بالطائرة. الصورة من مكتبة الكونجرس.

يُضغط هذا الهواء بشدة بوساطة المكبس، ما يولد حرارة تفوق درجة حرارة اشتعال الوقود... وهنا تتم إضافة الوقود... تدريجياً بحيث يحدث الاحتراق دونما ضغط كبير أو زيادة في درجات الحرارة بسبب تحرك المكبس إلى الخارج وتمدد الهواء المضغوط... (ديزل 1893أ، 1)

ووفقاً لما ورد في الوثائق، لم يكن بالإمكان تحويل براءة الاختراع إلى محرك تشغيل، ومنحت براءة الاختراع الثانية عام 1895، حيث حصل ديزل حينها على مساعدة عملية من هاينريتش فون باز Heinrich von Buz أ(1833-1918)، المدير العام لمشروع ماشين فابريك

آوغزبورغ Maschinenfabrik Augsburg، وهو المشروع الرائد على مستوى البلد لهندسة الميكانيك، ومنتج الفولاذ الرائد فريدريك ألفرد كروب Friedrich Alfred Krupp أ(1854-1902)، التي أنفقت شركاته مبالغ طائلة على تطوير محرك التشغيل. وأشار اختبار منح الترخيص الرسمي لمحرك باستطاعة 13.5 كيلوواط بتاريخ 17 فبراير/شباط 1897 إلى كفاءة صافية بلغت 26.6% وضغط أعظمي سجل 34 ضغطاً جوياً، أي ما يعادل عُشر المواصفات الأصلية التي أعطاها ديزل (ديزل 1913). وبحلول خريف عام 1897 ارتفع الأداء حتى 30.2%. وعليه، حصل ديزل على محرك أفضل، ليحقق بالتالي معظم طموحاته، إلا أن آماله الأولى بالتأثير الاجتماعي لهذا المحرك ضاعت بالكامل، ما أعطى مثالاً آخر عن التبعات غير المقصودة للتقدم التقني (مربع 5-8).

كان طرح المحرك الجديد للاستخدام التجاري أبطأ ما كان متوقعاً في بادئ الأمر، حيث بيع منه أقل من 300 وحدة مع نهاية 1901 (سميل 2010ب). وفي عام 1903، بدأت أول سفينة تعمل بطاقة الديزل، وهي ناقلة نفط صغيرة اسمها «فاندال» بالعمل في بحر قزوين وعلى امتداد نهر الفولجا؛ وفي عام 1904 افتتحت أول محطة لتوليد الكهرباء تعمل بطاقة الديزل في مدينة كييف، بينما كانت «إيجريت» أول غواصة تعمل بالديزل. إلا أن أعظم التطورات جاءت في فبراير/شباط 1912، حين باتت سفينة «سيلانديا» الدنماركية (سفينة الشحن والركاب ذات الحمولة القصوى 6.800 طن) أول سفينة عابرة للمحيطات تعمل بمحرك ديزل. وقبل عام من وفاته، وتحديداً في منتصف عام 1912، كتب ديزل «لقد صيغ اليوم فعل جديد في الدوائر البحرية، ألا وهو اعتماد الديزل. نحن لا نفعل شيئاً سوى اعتماد الديزل... عبارة يرددونها اليوم في كل مكان». (ديزل 1937، 421).

أدى النجاح السريع لمحركات الاحتراق الداخلي، التي تشغل المركبات البرية والطائرات والسفن، والتي بدأت تمتد إلى قطاع الزراعة لتشغيل الآليات الزراعية كالجرارات والحصادات ومضخات الري، إلى الاستعاضة عن حيوانات الجر في الزراعة الغربية، إلا أنها لم تنه العصر البخاري. مع ذلك، بدأ محرك أساسي آخر يتوافر تجارياً قبل نهاية القرن التاسع عشر، لترسم تطوراته اللاحقة كثيراً من ملامح التطورات الصناعية التي شهدها القرن العشرون. وقد تمثل ذلك الاختراع العظيم في العنفة البخارية، التي انتشرت بوصفها محركاً رئيساً متفوقاً يشغل مولدات الكهرباء في محطات مركزية تتوسع توسعاً مطرداً.

الكهرباء

فهمت الخصائص والقوانين الأساسية للكهرباء بشكل منتظم من خلال أعمال كثير من العلماء والمهندسين الأوروبيين والأمريكان في أواخر القرن الثامن عشر والعقود الستة الأولى من القرن التاسع عشر، كما اعترف بإسهاماتهم الرائدة في كثير من الحالات من خلال استخدام نَسَبهم في الوحدات الفيزيائية الأساسية. ومن السمات البارزة للقرن الثامن عشر نذكر تجارب لويجي جالفاني Luigi Galvani أ(1737-1798) على أرجل الضفادع في تسعينيات القرن الثامن عشر

(وبالتالي فكرته الخاطئة عن «كهرباء الحيوانات»)، ودراسات تشالز أوغستين كولومب Charles Augustin Coulomb أ(1736-1806) للقوة الكهربائية (الكولومب هو الوحدة القياسية اليوم للشحنة الكهربائية)، وصناعة أليساندرو فولطا Alessandro Volta أ(1745-1827) لأول بطارية كهربائية (ليصبح الفولط وحدة الكمون الكهربائي).

وفي عام 1891 أماط هانز كريستيان أورستد Hans Christian Ørsted أ(1777-1851) اللثام عن التأثير المغناطيسي الذي تحدثه التيارات الكهربائية (وتُسمى وحدة المجال المغناطيسي الآن أورستد)، وفي عشرينيات القرن التاسع عشر، وضع أندريه ماري أمبير André-Marie Ampère أ(1775-1836) مفهوم الدارة الكاملة وحدد حجم التأثيرات المغناطيسية التي يحدثها تيار كهربائي (الأمبير هو وحدة التيار الكهربائي). ولعل أياً من اكتشافات مطلع القرن التاسع عشر هذه لم يكن أهم من عرض مايكل فاراداي Michael Faraday أ(1791-1867) للتحريض الكهرطيسي (الشكل 5-9). إذ انبرى فاراداي للإجابة عن سؤال بسيط، كان فحواه - كما بين أورستد - إن كانت الكهرباء تحرض المغنطيسية، فهل المغنطيسية قادرة على تحريض الكهرباء؟ لدينا

مربع 5-8

محرك ديزل: النية والنتيجة

تمثل طموح ديزل في إنتاج محرك خفيف الوزن وصغير الحجم (بحجم ماكينة الخياطة المعاصرة) وزهيد الثمن يمكن لأصحاب الأعمال المستقلين اقتناءه (ميكانيكيون، صناع ساعات، وأصحاب مطاعم) ويتيح إمكانية تطبيق لامركزية الصناعة على نطاق واسع. ومن أحلامه الاجتماعية العظيمة، جاء ما يلي:

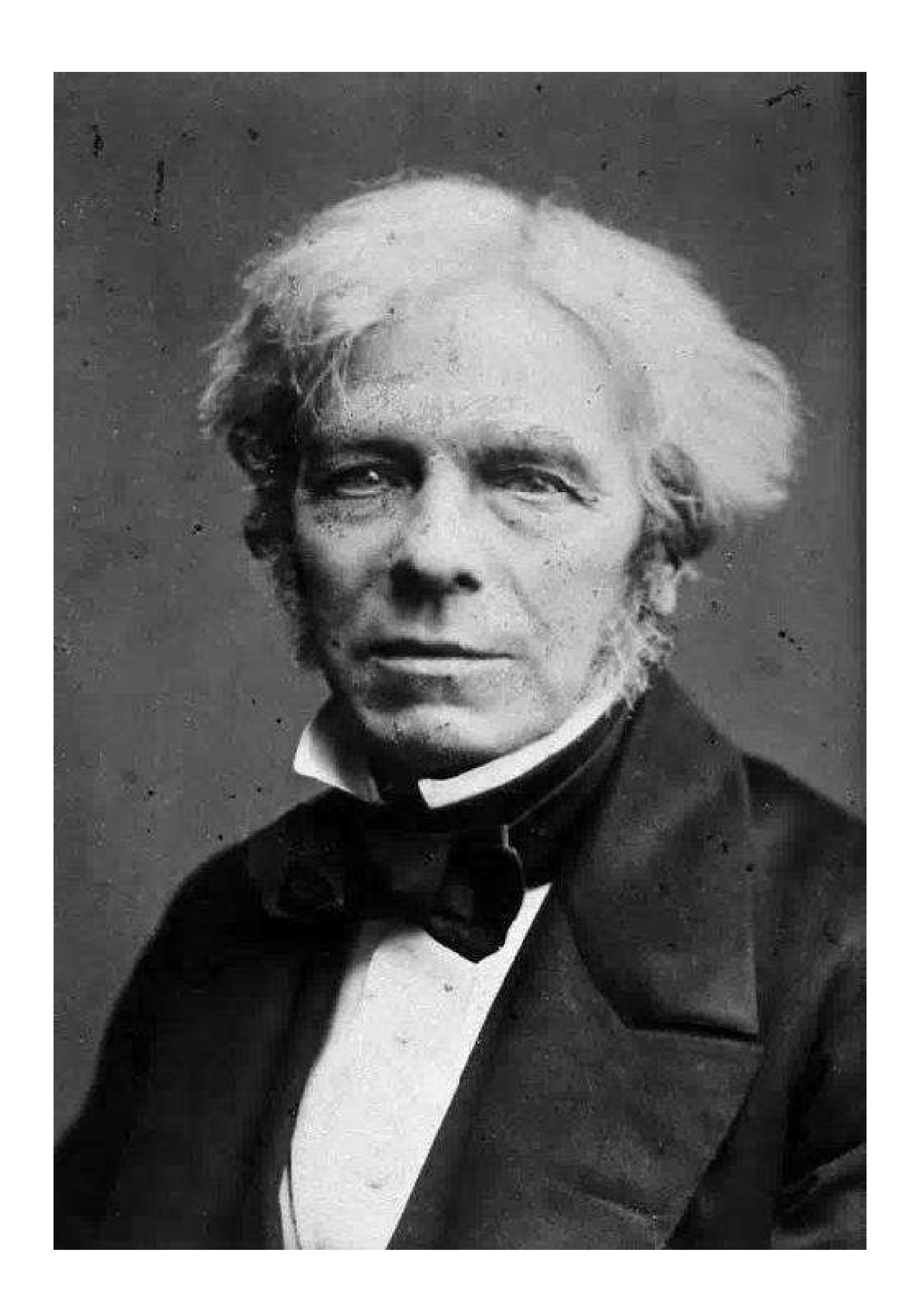
لا يختلف اثنان بأن تطبيق لامركزية الصناعات الصغيرة بقدر ما نستطيع ومحاولة تأسيسها في المناطق المحيطة بالمدن، وحتى في الأرياف، يبقى أفضل من حصرها بشكل مركزي في مدن ضخمة ومزدحمة ينعدم فيها الهواء والضوء والمكان. لكن لا سبيل إلى تحقيق الهدف المنشود إلا من خلال اعتماد محرك مستقل، المحرك الذي تسهل صيانته والذي أعرضه لكم في هذا المقام. لا شك في أن هذا المحرك يحدث تطوراً أقوم للصناعة الصغيرة قياساً بالاتجاهات السابقة التي حفها الزيف على المستوى الاقتصادي والسياسي والإنساني والصحي. (ديزل 1893ب، 89).

وبعد عقد من الزمن، روّج إلى معامل يديرها العمال في كتابه *Solidarismus: Natürliche wirtschaftliche Erlösung des Menschen* أ(ديزل 1903)، كما حلم بعصر تسوده

النزاهة والعدالة والسلام الأخوي، والتعاطف والمحبة، وشاهد الجمعيات التعاونية للعمال كخلايا نحل والعمال أنفسهم كالنحل الحامل للهويات والعقود. إلا أنه لم يبع سوى 300 نسخة من أصل 10.000 نسخة من هذا الكتاب، كما لم تلتف المجتمعات الحديثة حول الجمعيات التعاونية الخاصة بالعمال. وأخبر ديزل نجله أن «إنجازي الأساسي يكمن في إيجادي حل للمسألة الاجتماعية» (ديزل 1937، 395)، إلا أن الاستخدامات الأكثر أهمية لمحركات ديزل لم نرها في الورشات المتواضعة، بل كانت في الآليات الثقيلة والشاحنات والقاطرات، وكذلك، بعد الحرب العالمية الثانية، في ناقلات النفط والناقلات العملاقة والسفن المخصصة للحاويات، لتساعد بذلك على إيجاد رؤية جاءت على نقيض رؤية ديزل تماماً، وهو تركيز غير مسبوق للتصنيع بكميات كبيرة وتوزيع غير باهظ الثمن لمنتجاته ضمن اقتصاد عالمي جديد (سميل 2010ب).

تاريخ دقيق ووصف مفصل عن إجابته التي اكتشفها (مربع 5-9).

فتح عرض فاراداي لإمكانية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية (لتوليد تيار متناوب) وبالعكس الباب أمام الإنتاج العملي وتحويل الكهرباء التي لا تعتمد على بطاريات ثقيلة ومنخفضة كثافة الطاقة أو تكون مقيدة بتلك البطاريات. وحين



الشكل 9-5

مايكل فاراداي، الصورة من مكتبة ويلكم، لندن.

مربع 9-5

اكتشاف فاراداي للتحريض الكهرطيسي

فاراداي، المساعد الذي اعتمد على التعليم الذاتي لدى المؤسسة الملكية، والذي عمل جل وقته مع هامفري دايفي Humphry Davy أ(1778-1829)، هو أول عالم يصف القوس الكهربائية الناتجة عن المباعدة بين قطبي كربون بشكل طفيف، ونشر أول عمل بارز له حول الكهرباء (في دورة كهرطيسية) بتاريخ 1821، حيث قدم فيه شرحاً موجزاً عن مبدأ المحرك الكهربائي. كذلك بدأ سلسلة جديدة من التجارب عام 1831، تمخضت في النهاية عن اكتشافه للتحريض الكهرطيسي بتاريخ 17 أكتوبر/تشرين الأول 1831. ونتيجة قلق ساوره بأن تكون نتائجه حصيلة تصميم تجريبي، قام بتنفيذ التجربة الأخيرة باستخدام تقنية مختلفة، حيث أنتج تياراً مستمراً. وعرض فاراداي النتائج في محاضرة للجمعية الملكية بتاريخ 24 نوفمبر/تشرين الثاني 1831. وفيما يلي الطريقة التي اعتمدها لشرح تلك النتائج في الأبحاث التجريبية على الكهرباء (فاراداي 1832، 128):

في التجارب السابقة، وضُع سلكان جنبا إلى جنب، وجرى توصيل السلك المحرض مع البطارية عند الحاجة إلى إحداث تأثير تحريضي. ونظراً لاحتمال إطلاق جهد ما معين لحظة توصيل السلكين وفصلهما، فقد تم إنتاج التحريض بطريقة أخرى. تمدد السلك النحاسي الذي كان بطول عدة أقدام واتخذ أشكالاً متعرجة عريضة، تشبه حرف W على جهة واحدة من لوح عريض، وتمدد السلك الثاني بأشكال مشابهة تماماً على لوح ثانٍ، بحيث عند تقريب السلك الثاني من السلك الأول، سيتلامس السلكان على امتدادهما، وذلك إن لم يتم الفصل بينهما بورقة سميكة. وتم توصيل أحد هذين السلكين بمقياس جلفانومتر، والآخر ببطارية فولطية. بعد ذلك، تم تحريك السلك الأول باتجاه الثاني، لتنحرف الإبرة مع اقترابه منه. وبعد إبعاده، انحرفت الإبرة بالاتجاه المعاكس. ومع تقريب السلكين من بعضهما ومن ثم إبعادهما، بالتزامن مع اهتزازات الإبرة، وصلت الإبرة إلى مجالات واسعة جداً، لكن مع إيقاف حركة تقريب السلكين وابعادهما، عادت إبرة مقياس جلفانومتر إلى وضعها الطبيعي.

ومع تقارب السلكين، كان التيار المحرَّض يسير بالاتجاه المعاكس للتيار المحرِّض. لكن عند ابتعاد السلكين، كان التيار المحرَّض باتجاه التيار المحرِّض نفسه. وعند بقاء السلكين ثابتين، لم يكن هنالك أي تيار محرَّض.

نشر جول فيرن Jules Verne أ(1828-1905) كتابه بعنوان «عشرون ألف فرسخ تحت سطح البحر»، شرح لأروناكس من خلال القبطان «هناك عامل قوي ومطيع، سريع، ويسير، مناسب لكل الاستخدامات، يتولى زمام القيادة بأسمى أشكالها على سطح سفينتي. كل شيء يتم عن طريقه. فهو يوفر لها الضوء والدفء، كما أنه الروح لجهازي الميكانيكي. أعرفكم على هذا العامل، إنه الكهرباء». لكن في عام 1870، كان كل ما تحدث عنه مجرد خيال علمي، إذ لم يكن بالإمكان آنذاك توليد الكهرباء على نطاق واسع، كما كانت استطاعات المحركات الكهربائية مقيدة بالطاقة التي توافرها بطاريات صغيرة.

لم يكن هذا التأخير غريباً إطلاقاً، نظراً لأن توليد الكهرباء ونقلها وتحويلها إلى حرارة وضوء وحركة، وامكانيتها الكيميائية اعتبرت كلها إنجازاً لا يضاهى وسط الابتكارات المتعلقة بالطاقة. ففي السابق، صُممت مصادر جديدة للطاقة ووسائط تحريك أساسية جديدة لتنفيذ مهام على نحو أسرع أو أرخص أو أقوى، وكان بالإمكان استخدامها بيسر ضمن ترتيبات إنتاجية موجودة (على سبيل المثال، تم تدوير الطواحين الحجرية اعتماداً على ناعورة بدلاً من الحيوانات). بالمقابل، استدعى إدخال الكهرباء ابتكار منظومة جديدة لتوليدها وتطويرها وتركيبها بالكامل على نحو موثوق وبسعر ميسور من أجل نقلها بأمان لمسافات بعيدة وتوزيعها محلياً على المستهلكين، فضلاً عن تحويلها بكفاءة لتوفير أشكال الطاقة النهائية المطلوبة من قبل مستخدميها.

بدأ التداول التجاري للكهرباء بالتزامن مع السعي نحو مستوى إضاءة أفضل. وكما أشرنا آنفا، فقد عرض دايفي تأثير القوس عام 1808، إلا أن الأضواء الأولى المتولدة عن قوس كهربائية أضيئت لفترة قصيرة في قصر دي لا كونكورد في شهر ديسمبر/كانون الأول 1844 وبعدها في رواق المعرض الوطني بلندن في شهر نوفمبر/تشرين الثاني 1848. وفي عام 1871، عرض ز. ت. غرام Z. T. Gramme أ(1826-1901) أول مولد وشيعي، أطلق عليه اسم الآلة الكهرطيسية المولدة للتيار المستمر أمام أكاديمية العلوم في باريس (شوفوا Chauvois أ1967). ليفتح هذا التصميم في نهاية المطاف الباب أمام مصابيح القوس الكهربائية التي تعمل على طاقة الكهرباء الناتجة عن المولدات: فمنذ عام 1877 أضاءت الأقواس الكهربائية بعض الأماكن العامة الشهيرة في باريس ولندن، وفي منتصف ثمانينيات القرن التاسع عشر، انتشرت في كثير من المدن الأوروبية والأمريكية (فيجير 1888؛ باور 1998). إلا أن مراقبتها كانت مطلوبة حفاظاً على استمرارية القوس على اعتبار أن التيار يستهلك القطب الموجب، وكانت غير مناسبة للاستخدام الداخلي، كما كان الإمداد مجدداً بالأقطاب المستهلَكة تحدياً لوجستياً كبيراً. فللحصول على قوس كهربائية باستطاعة 500 واط بمسافة فاصلة 50 م، احتاج كل كيلومتر من الطرقات في المدينة إلى 3.6 كم من أقطاب الكربون بسماكة 15 و9 مم سنوياً (جاركي 1911).

أما السعي للحصول على إنارة داخلية ناتجة عن الفتائل المتوهجة فقد امتد لأربعة عقود، وذلك بدءاً من تجارب وارن دو لا ري Warren de La Rue في ثلاثينيات القرن التاسع عشر باستخدام وشيعة بلاتين وحتى عام 1879، عندما أماط أديسون اللثام عن أول مصباح كربون خيطي معمر (أديسون 1880)، فضلاً عن أن هذه العملية اشتملت على عدد لا بأس به من المخترعين المميزين (الذين طواهم النسيان اليوم) من المملكة المتحدة وفرنسا وألمانيا وروسيا وكندا والولايات المتحدة (بوب 1894؛ كراك 1911؛ هويل وشرودر 1927؛ فريدل وإسرائيل 1986؛ باورز 1998). وفي هذا المقام، أجد لزاماً عليَّ أن أشير على الأقل إلى هيرمان سبرينجل Hermann Sprengel، الذي اخترع مضخة بخار الزئبق لإنتاج حيز مفرغ من الهواء عام 1865؛ وجوزيف ويلسون سوان Joseph Wilson Swan أ(1828-1914) الذي بدأ عمله عام 1850 ليحصل في نهاية المطاف على براءة اختراع في المملكة المتحدة لمصباح فتائل الكربون عام 1880؛ والكنديين هنري وودوارد Henry Woodward وماثيو إيفانز Matthew Evans، حيث كانت براءة الاختراع التي نالاها عام 1875 بمثابة أساس لعمل أديسون. ويبقى السؤال المطروح في هذا المقام، لم إنجازات أديسون فاقت بأشواط نظيراتها لكثير من منافسيه وممن سبقه؟

نجح أديسون لأنه أدرك أن الهدف من السباق ليس الحصول على أول مصباح موثوق وحسب، بل لوضع نظام تجاري عملي متكامل لمصابيح الكهرباء في موقعه الصحيح، وهذا ينطوي على توليد موثوق للكهرباء، ونقلها، وقياسها (فريديل Friedel وإسرائيل Israel أ1986؛ سميل 2005). ونتيجة لذلك، نجد أن اختراع الصناعة الكهربائية قد تم توجيهه من خلال رؤية رجل واحد أكثر من أي حالة أخرى من حالات الابتكار خلال القرن التاسع عشر. استدعى هذا تحديداً دقيقاً للتحديات التقنية، وإيجاد حلّ لها من خلال أبحاث وتطورات متضافرة ذات اختصاصات متداخلة مع إقحام الابتكارات الناتجة في الاستخدام التجاري على جناح السرعة (جيل Jehl أ1937؛ جوزيفسون Josephson أ1959). كما ظهر مخترعون معاصرون آخرون للمصباح الكهربائي، أو المولدات العملاقة، إلا أن أديسون كان وحده الذي يمتلك رؤية نظام كامل اقترنت بإصرار وموهبة تنظيمية لتنفيذ العمل بأكمله (مربع 5-10، الشكل 5-10).

ومما لا يمكن نكرانه أن أديسون كان شخصاً مبتكراً قل نظيره وتحلى بإصرار كبير (إذ لا شيء تغلب على التزامه الفكري سوى قدرة تحمله البدنية الأسطورية)، حيث كانت صفاته المتناقضة كمخترع عقلاني ومتفانٍ من جهة وكرجل يريد الترويج لذاته ويطلق ادعاءات مشكوكاً فيها من جهة أخرى، مصدر إلهام للعاملين معه أو سبباً لنأيهم عنه. ولم يكن له أن يحقق الكثير لولا تلقيه تمويلاً سخياً من بعض أغنى رجال الأعمال في تلك الفترة، حيث جنى فائدة كبيرة من هذا الاستثمار، حيث بحث مختبره «مينلو بارك Menlo Park» الكثير من المفاهيم والخيارات الجديدة، التي يستحق أن نعتبرها طلائع لأقسام البحوث والتطوير بالمؤسسات والتي قادت ابتكاراتها إلى ظهور كثير من ملامح القرن العشرين.

أعطى فتيل أديسون المصنوع من خيوط القطن المخصصة للخياطة والمشبع بالكربون، بعد وضعه داخل حيز مفرغ من الهواء، ضوءاً ثابتاً في أول مصباح إنارة بتاريخ 21 أكتوبر/تشرين الأول

1879، وعرض 100 من مصابيحه الجديدة في مينلو بارك بنيوجيرسي بتاريخ 31 ديسمبر/ كانون الأول 1879 عن طريق إنارة مختبره والشوارع القريبة منه، فضلاً عن إنارة محطة القطار. ورغم قلة كفاءة المصابيح الأولى، إلا أن أداءها تفوق على أي مصدر إنارة معاصر آنذاك. إذ كانت أسطع بنحو عشرة أضعاف مصابيح قميص الغاز وبمئة مرة قياساً بالشمعة. ولعل تطورات الإنارة هذه لم تكن أقل أهمية من حيث تحديث الصناعة وتحسين مستوى المعيشة عن إدخال جيل أفضل من وسائط التحريك الأولية.

كان إنتاج مصباح يُعمّر مجرد بداية، فبعد ثلاث سنوات من اختراعه، تقدم أديسون بطلب الحصول على نحو 90 براءة اختراع جديدة تتعلق بالفتائل والمصابيح، و60 ذات صلة بالآلات الكهرطيسية أو الكهربائية المستمدة من المولد، و14 طلباً آخر خاصاً بمنظومة الإنارة، و12 لتوزيع الكهرباء، و10 طلبات تتعلق بالكهرباء وبالعدادات والمحركات الكهربائية (أوراق توماس أديسون Thomas Edison Papers أ2015). وفي الوقت نفسه، ترجم، بالتعاون مع شركائه في العمل، هذه الأفكار إلى حقائق عملية في فترة قصيرة غير متوقعة. فقد بدأت أول محطة لتوليد الكهرباء، أنشأتها شركة لندن التي تملكها إشركة أديسون في هولبورن فيادكت Holborn Viaduct، ببث الطاقة في 12 يناير/كانون الثاني 1882. وكانت محطة شارع بيرل في نيويورك، التي وضعت في الخدمة في 4 سبتمبر/أيلول من ذات العام، أول محطة أمريكية للطاقة الحرارية. إذ بعد شهر من افتتاحها وفرت الطاقة لنحو 1.300 مصباح في الحي المالي للمدينة، ليصل عدد المصابيح الموصولة بها بعد عام إلى أكثر من 11.000 مصباح.

هنا أجد حقيقتين بارزتين. أولهما تضافر الرؤى ونوعية العمل النهائي الذي جعل نظام أديسون ناجحاً وكاملاً حتى أننا لا نزال نعتمد معاييره الأساسية حتى اليوم. ورغم نقّاد هذا النظام والأسئلة التي دارت حوله (انظرمربع 5-9)، نجد أن الذين فهموا تفاصيله وتعقيداته وهم يحاولون تصميم مثل هذا النظام من جديد قدروا

مربع 5-10

النظام الكهربائي لأديسون

كان لأول مصباح كهربائي معمر، عرضه جويف سوان في نيوكاسل أون تاين بتاريخ 18 ديسمبر/كانون الأول 1878 ذات المكونات الموجودة في أول مصباح مديد العمر أنتجه أديسون، والذي حصل على براءة اختراعه بعد 10 أشهر: أسلاك توصيل من البلاتين وفتيل من الكربون (مجلس الكهرباء Electricity Council أ1973؛ باورز Bowers أ1998). إلا أن فتيل سوان اتسم بمقاومة منخفضة جداً (<5-1 Ω) وتطلب استخدامه على نطاق واسع جهداً منخفضاً جداً وبالتالي تيارات مرتفعة جداً وأسلاك نقل ضخمة. إضافة إلى ذلك، كانت المصابيح السابقة لعهد أديسون موصولة على التوالي وتغذى بتيار ثابت من إحدى المولدات، ما يعجل إنارة مصابيح فردية ضرباً من المستحيل، ما يعني إطفاء النظام بأكمله بعملية قطع واحدة. وأدرك

أديسون أنه كي نحصل على نظام إنارة عملي من الناحية التجارية، عليه تخفيف استهلاك الكهرباء إلى حدّه الأدنى باستخدام فتائل عالية المقاومة وموصولة على التوازي في نظام جهد ثابت.

وقد تناقض هذا الفهم كلياً مع الإجماع التقني السائد آنذاك (جيل 1937)، لكن من خلال مقارنة بسيطة يمكن توضيح التبعات العملية لهاتين الطريقتين. في النظم السابقة لعهد أديسون: مصباح باستطاعة 100 واط وبمقاومة 2 Ω - تطلب 7 أمبير. أما اختيار أديسون لمقاومة 140Ω فقد احتاج إلى 0.85 أمبير فقط، وخفض بشكل كبير من تكلفة النواقل النحاسية (مارتن Martin أ1922). وجاء في الطلب الذي قدمه أديسون بتاريخ 12 أبريل/نيسان 1879 للحصول على براءة الاختراع: «مع استخدام هذه المصابيح عالية المقاومة بات بمقدوري وضع عدد أكبر من هذه المصابيح في الأقواس المتعددة من دون إيصال المقاومة الكلية للمصابيح كافة إلى نقطة متدنية تتطلب ناقل رئيس كبيراً؛ لكن بالمقابل، كان بوسعي استخدام ناقل رئيس لأبعاد متواضعة جداً» (أديسون 1880، 1). وتطلب قانون أوم أن المواصفات التي جاء بها أديسون احتاجت إلى تغذية بجهد 118 فولط، وهذا الجهد (110-120 فولط) هو القياسي في أمريكا الشمالية (واليابان)، بينما تعتمد أوروبا جهد 240 فولط.

إلا أن القرار بالكاد حظي بالإجماع. فأنا أوافق هيوز (1983-18) بأن «أديسون كان صاحب مفهوم شامل وشخصاً صاحب عزيمة على إيجاد حلول لمشكلات ارتبطت بتطور الأنظمة... لقد تجاوزت مفاهيم أديسون ما صبا إليه لإيجاد مبادئ تنظيمية قوية بما يكفي لتكاملها والسماح بتوجيه هادف للعوامل والمكونات المتنوعة». إلا أن فريدل وإسرائيل (1986، 277) خلصا إلى أن «كمال هذا النظام جاء نتيجة الفرص التي وفرتها الإنجازات التقنية والموارد المالية أكثر من كونه نتيجة نهج هادف للنظم».



الشكل 5-10

توماس أديسون عام 1882، وهو العام الذي بدأت فيه أول محطة لتوليد الكهرباء باستخدام طاقة الفحم بالعمل في منهاتن السفلى. الصورة من مكتبة الكونجرس.

قيمة هذا الإنجاز. ولعل الإشادة الأكبر جاءت من إيميل راثيناو Emil Rathenau، مؤسس Allgemeine Elektrizitäts Gesselschaft، أكبر منشأة لتصنيع التجهيزات الكهربائية ورائدة صناعة الكهرباء الأوروبية إذ استرجع في عام 1908 انطباعاته عقب مشاهدته للعرض في معرض باريس الكهربائي عام 1881:

صُمم نظام أديسون الخاص بالإنارة تصميماً بديعاً مع مراعاة التفاصيل بدقة، واتسم بفعالية تامة وكأنه اختبر لعقود في العديد من المدن. لم يكن ينقصه أي شيء سواء على مستوى مآخذ الكهرباء أو القواطع أو الفواصم أو حاملات المصابيح، أو أي شكل آخر من أشكال المستلزمات الضرورية الأخرى لإكمال التركيب. كما أظهر توليد التيار وتنظيمه والأسلاك مع علب التوزيع والتوصيلات المنزلية والعدادات وما إلى ذلك مهارات كانت محط إعجاب ودلت على عبقرية لانظير لها. (في داير Dyer ومارتن Martin أ1929، 318-319).

ولعل الحقيقة الثانية أبرز من سابقتها. فعلى الرغم من كون عمل إديسون جوهرياً وواسع النطاق، إلا أنه لم يكن ليكفي وحده لبناء منظومة كهرباء حديثة ومعمرة وذات كفاءة: فجميع الابتكارات اللازمة وجب استثمارها لا في مدة قصيرة فحسب (جميعها كانت في ثمانينيات القرن التاسع عشر التي مثلت فترة الإعجاز) بل بطريقة أقرب ما تكون إلى المستوى المثالي. وبعد أكثر من 120 عاماً، شهدت المكونات الأساسية لأنظمتنا الكهربائية المنتشرة - كالمولدات التوربينية البخارية، والمحولات، ونقل التيار المتناوب عالي الجهد - تطورات على مستوى الكفاءة والسعة والثبات، إلا أن تصميمها وخصائصها الأساسية تبقى عينها، حيث يسهل على موجديها إدراك أحدث الاختلافات التي طرأت على ما قاموا باختراعه.

صحيح أن المصابيح المتوهجة تراجعت أمام مصابيح الفلورسنت[29] (التي بدأ طرحها تجارياً في ثلاثينيات القرن العشرين)، وأمام مصادر الإنارة الأكفأ (كبخار الصوديوم ومصابيح الكبريت والصمامات - الدايودات - المضيئة)، إلا أن المحركات الكهربائية، التي تعد مكوناً رئيساً آخر للمنظومة من ثمانينيات القرن التاسع عشر، تبقى الأكثر شيوعاً للنظام الكهربائي الشامل. وهذا ما

يدفعني إلى البحث في أربعة اختراعات أو ابتكارات جوهرية - ليست من اختراع أديسون - لكنها ساعدت في ترجمة القدرة النظرية العظيمة للكهرباء إلى واقع اقتصادي واجتماعي شامل، ألا وهي العنفات البخارية، والمحولات، والمحركات الكهربائية، ونقل الكهرباء باستخدام التيار المتناوب.

أشرت آنفا إلى نسب الكتلة/الطاقة المرتفعة في المحركات البخارية وإلى تقديرات طاقتها المحدودة. وسرعان ما تم التخلي عن هذه الوسائط الأولية للتحريك، التي اتسمت بضخامة حجمها وكفاءتها المعدومة نسبياً، بعد حصول تشالز بارسونز Charles Parsons أ(1854-1931) على براءة اختراع العنفة البخارية الأصغر والأخف والأكفأ عام 1884 (بارسونز 1936). وقامت شركة بارسون بتركيب عنفة باستطاعة 75 كيلوواط في محطة نيوكاسل عام 1888، لتتطور إلى وحدة باستطاعة 1 ميغاواط وضعت في محطة ألبيرفلت في ألمانيا عام 1900. أما أكبر عنفات بارسون قبل الحرب العالمية الأولى فأقيمت في شيكاغو عام 1912، وكانت باستطاعة 25 ميغاواط (سميل 2005). وفي حين أن سرعة دوران المحركات البخارية لم تكن لتتجاوز بضع مئات الدورات في الدقيقة، وصلت سرعة دوران العنفات الحديثة إلى 3.600 دورة في الدقيقة، وهي قادرة على العمل بضغط حتى 34 ميغاباسكال، وبدرجة حرارة فائقة للبخار تصل حتى 600 o مئوية، ما ينتج كفاءات تصل حتى 43% (تيرموهلين Termuehlen أ2001؛ ساركار Sarkar أ2015). كما يمكن صناعة هذه العنفات بكفاءات تتراوح بين بضعة كيلو واطات إلى أكثر من 1 جيغا واط، وبحجم يتراوح من مولد صغير لتحويل الحرارة إلى الكهرباء على نطاق ضيق إلى مولدات عنفية ضخمة في محطات الطاقة النووية.

تستحق المحولات الفوز في مسابقة تقام لاختيار أفضل جهاز من حيث انتشاره وعدم إمكانية التخلي عنه في العالم الحديث ويكون في الوقت عينه غائباً عن وعي الناس (كولتمان 1988). فبفضل هذه المحولات التي عادة ما تكون مخفية (تحت الأرض، داخل المباني، خلف الأسوار المرتفعة)، وساكنة وثابتة، صار من الممكن توليد كهرباء مركزية رخيصة الكلفة. وكان نقل التيار الكهربائي المباشر في أوائل عهده من المحطات إلى العملاء محدوداً، حيث إن تمديد مسافة نقل الكهرباء لأكثر من ربع ميل مربع يتطلب تركيب موصلات ضخمة، والتي، تبعاً لما خلص إليه سيمنز (1882، 70) «لا يمكن مدها داخل قنوات ضيقة أسفل حجارة الرصيف، بل استلزمت إنشاء أنفاق مكلفة - تجاويف كهربائية حقيقية». أما الخيار الوحيد الآخر فكان إنشاء محطات عديدة تخدم مساحات محلية محدودة، وكلا الخيارين مكلف للغاية. أما محولات التيار المتناوب فقدمت حلاً موثوقاً رخيص الكلفة (مربع 5-11).

ذكرنا فيما سبق أن المحولات تعمل بالتحريض الكهرطيسي، تلك العملية التي اكتشفها فاراداي والتي لم يأت تطورها إثر اختراع جديد، بل جاءت حصيلة تحسينات تدريجية طرأت عليها اعتماداً على رؤية فاراداي الأساسية. وعُرض تصميم أولي مؤثر وضعه لوسين جوالارد Lucien H. Gaulard أ(1850-1888) وجون جيبس John D. Gibbs عام 1883، وطوره لاحقاً ثلاثة مهندسين هنغاريين باستخدام نوى حديدية مغلقة، إلا أن وليم ستانلي William Stanley أ(1858-1916)، المهندس الشاب الذي عمل لدى ويستينغهاوس Westinghouse، طور عام 1885 أنموذجاً أولياً لجهاز مازلنا نستخدمه حتى يومنا هذا، استطاع بوساطته نقل تيار متناوب

عالي الجهد من محطات الطاقة بفاقد منخفض نسبياً وتوزيعه بجهد منخفض إلى المنازل والمراكز الصناعية (كولتمان Coltman 1988).

شهدت استطاعات وجهد المحولات، مثلها مثل مكونات أخرى للنظم الكهربائية الجديدة، تطوراً سريعاً في ما تبقى من القرن التاسع عشر وقبل الحرب العالمية الأولى. وفي هذا المقام لا يمكنني أن أعطي تقييماً أفضل لهذا الجهاز العبقري رغم بساطته ما وصفه ستانلي في كلمة له عام 1912 أمام المعهد الأمريكي لمهندسي الكهرباء:

> إنه الحل الكامل والبسيط لمشكلة معقدة، ما يجعله متفوقاً على المحاولات الميكانيكية كافة من حيث التنظيم. فهو يتعامل مع الحمولات الهائلة للطاقة الواردة إليه والصادرة عنه بكل بساطة وتيقن على نحو اقتصادي. إنه على درجة كبيرة من الموثوقية والقوة واليقين. ففي هذا الفولاذ والنحاس المتشابك، ثمة قوى غير عادية تعمل بتوازن متناغم على نحو لا يمكن توقعه. (ستانلي 1912، 573).

كانت المحولات أساسية لظهور التيار المتناوب كخيار قياسي للشبكات الكهربائية الجديدة. أما التيار المباشر فكان خياراً منطقيا لأولى الشبكات الصغيرة المعزولة التي تخدم قطاعات من المدن، حيث ظهرت بعض المخاوف التي لا يمكن إنكارها حيال سلامة استخدام التيار المتناوب عالي الجهد (HVAC). لكنه لم يبرر الحملة العدوانية المناهضة للتيار المتناوب الخاص بأديسون، التي انطلقت عام 1887 والتي اشتملت على قتل الكلاب والقطط الشاردة بالكهرباء فوق صفيح معدني مشحون بجهد 1 كيلو فولط مستمد من مولد تيار متناوب (لإظهار المخاطر الفتاكة للتيار المتناوب) والهجمات الشخصية على جورج ويستيغهاوس (1846-1914)، الصناعي الأمريكي الرائد، وموظِف ستانلي، ومن أوائل مروجي التيار المتناوب.

وحتى في عام 1889 كتب أديسون «أرغب شخصياً بمنع استخدام التيارات المتناوبة منعاً باتاً. فعدم الحاجة إليها يعادل مستوى خطرها... ولا أرى أي مبرر لإدخال أي نظام لا وجود لعنصر الديمومة فيه، بينما فيه كل العناصر الخطرة التي تتهدد الحياة والممتلكات» (أديسون 1998، 632). وفي معارضته للتيار المتناوب، وجد أديسون تحالفاً مدهشاً في المملكة المتحدة من جانب لورد كليفن، الفيزيائي الرائد على مستوى العالم. لكن بعد عام من ذلك، تحدث أديسون كمناصر للتيار المستمر، وقدم ديفيد (1991) أفضل شرح لهذه التطورات، قائلاً إن ما بدا كمعارضة

مربع 5-11

تحويل الكهرباء والفاقد الناجم عن نقلها

يتم توليد الكهرباء بأقصى كفاءة لها وتحويلها إلى المستخدم النهائي بجهد منخفض وبالشكل الأنسب، لكن نظراً لأن فاقد الكهرباء أثناء النقل يتناسب طردياً مع مربع التيار المنقول، يفضل استخدام جهد عالٍ للحد من فاقد الكهرباء أثناء النقل. وتقوم المحولات بالتحويل من تيار كهربائي واحد إلى آخر، إما من خلال خفض جهد التدفق الداخل أو زيادته، حيث تقوم المحولات بذلك من دون أي فاقد في الطاقة تقريباً وعلى امتداد طيف واسع من قيم الجهد (هارلو Harlow 2012أ)، حيث تتضح الفائدة بحسابات بسيطة. فاستطاعة الكهرباء المنقولة هي حاصل ضرب التيار بالجهد (واط = أمبير × فولت)؛ والجهد هو حاصل ضرب التيار بالمقاومة (قانون أوم، فولت = أمبير= Ω)، وبالتالي تكون الاستطاعة هي حاصل A2Ω.

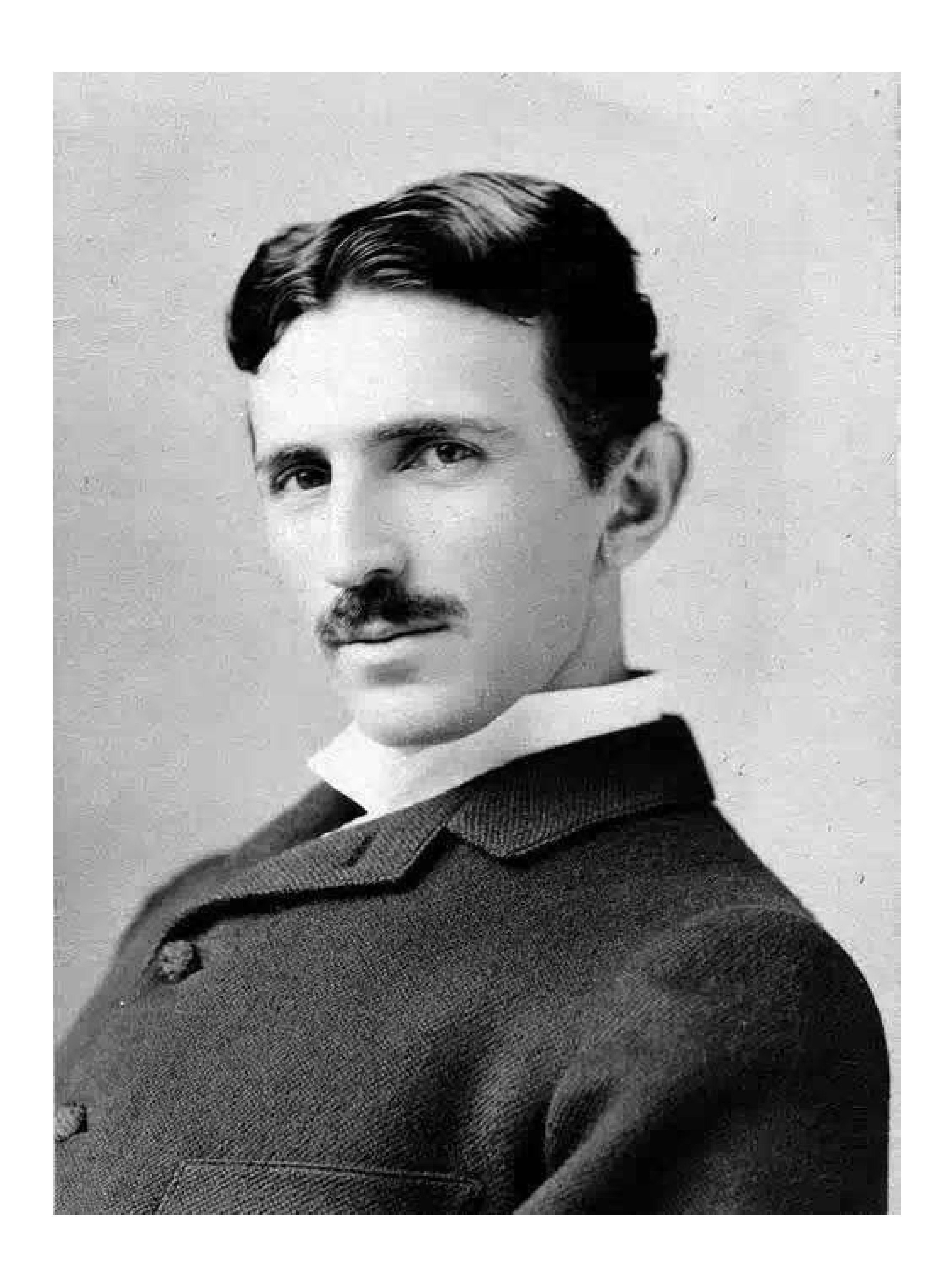
وبالتالي، ينخفض فاقد الطاقة (المقاومة) مع عكس مربع الجهد: فإذا ضاعفت الجهد 10 أضعاف، ستصبح مقاومة السلك فقط 1/ 100 عند نقل الكهرباء بالمعدل نفسه. وهذا يصب دائماً في صالح أعلى جهد يمكن الوصول إليه، لكن من الناحية العملية، تبقى زياداته محدودة باعتبارات أخرى (التفريغ التاجي، زيادة متطلبات العزل، حجم أبراج نقل الكهرباء) مع أن نقل الجهد العالي والجهد العالي جداً يتم بشكل روتيني بقيمة 240.000 - 750.000 فولت (240-750 كيلو فولط)، وهنا ينحصر فاقد الكهرباء المنقولة عادة بأقل من 7%.

غير منطقية من جانب أديسون كان في حقيقته بمنزلة خيار عقلاني اتخذ لدعم قيمة مشاريع أديسون، والتي التزمت بإنتاج مكونات النظم القائمة على التيار المستمر، وبالتالي تحسين شروط بيع حصصه المتبقية. وما أن تم بيع تلك الحصص حتى توقف الصراع فجأة.

إلا أن «معركة النظم» هذه جاءت بنتيجة محتومة: فالفيزياء الأساسية فضلت التيار المتناوب، حيث اعتمدت النظم الجديدة بعد عام 1890 على التيار المتناوب (ولاقى هذا التحول دعماً من خلال إدخال مقياس دقيق وزهيد الثمن للتيار المتناوب عام 1889)، بينما أمكن تحويل نظم التيار المستمر الموجودة، والتي كانت تغذي أكثر من نصف إنارة المدن في الولايات المتحدة عام 1891، إلى تيار متناوب والفضل في ذلك يعود إلى اختراع المحول الدوار، والذي تعود براءة اختراعه إلى تشارلز برادلي - الموظف السابق لدى أديسون - عام 1888: إذ أتاح هذا المحول استخدام التجهيزات الموجودة المولدة للتيار المستمر بالتزامن مع نقل تيار متناوب عالي الجهد عبر مناطق واسعة. وتسارع انتشار التيار المتناوب عالي الجهد من خلال بضعة مشاريع واسعة النطاق في تسعينيات القرن التاسع عشر، بما فيها محطة دتفورد الكبيرة في لندن، والتي خدمت ما يزيد على 200.000 مصباح، فضلاً عن تطوير أكبر وصلة للتيار المتناوب على مستوى العالم، وذلك من محطة شلالات نياجارا الكهرمائية إلى بوفالو (هنتر Hunter وبرايانت Bryant 1991أ). وكان أول استخدام للتيار ثلاثي الطور من قبل العامة في عام 1900، وارتفع أعلى جهد للنقل إلى 60 كيلو فولط عام 1900 وإلى 150 كيلو فولط عام 1913. وهذا، باتت كل مكونات توليد الكهرباء الحديثة ونقلها جاهزة قبل الحرب العالمية الأولى.

بعد مضي ثلاث سنوات على اختراع محوّل ستانلي، حصل نقولا تسلا على براءة اختراع أول محرك عملي للتحريض متعدد الأطوار يعمل بالتيار المتناوب (تشيني Cheney أ1981؛ الشكل 5-11). لكن هذا الاختراع، شأنه شأن تطور المصابيح المتوهجة، جاء بعد عقود من التجارب والمحاولات وحتى النشر على المستوى التجاري لتصاميم المحرك الذي يعتمد في عمله على التيار المستمر المستمد من بطارية، بدءاً من أواخر ثلاثينيات القرن التاسع عشر وحتى نهاية سبعينيات القرن التاسع عشر، وكذلك اعتماداً على المولدات (هنتر وبرايانت 1991). ولعل ارتفاع تكلفة التشغيل ومحدودية سعة البطارية وضعت المحركات الصغيرة العاملة بالتيار المستمر في مرتبة أدنى كمحركات أساسية قياساً بالمحركات البخارية.

غُذي أول محرك كهربائي صغير ناجح تجارياً يعمل بالتيار المستمر (بيع منه



الشكل 11-5

نقولا تسلا عام 1890. صورة التقطها نابليون ساروروني.

الآلاف) ببطارية ضخمة، وحصل أديسون على براءة اختراعه عام 1876. وكان من المقرر تركيب هذا المحرك فوق إبرة تسجيل لتوجيه قلم رسم ستنسل المستخدم في نسخ النصب التذكارية بطريقة ميكانيكية (بيساروف Pessaroff أ2002). ومع توافر مولدات ضخمة، ظهرت محاولات استخدام محركات صغيرة تعمل بالتيار المستمر لتغذية الترام (الذي ظهر في ألمانيا أولاً)، فضلاً عن أداء الكثير من المهام الصناعية الأخرى (وعلى رأسها تلك في الولايات المتحدة). أما التوقعات فتغيرت كلياً مع اختراع نقولا تسلا Nikola Tesla أ(1857-1943) الذي وُلد مفهومه في أوروبا وتحول إلى آلة عاملة بعد هجرة المهندس الصربي الشاب إلى الولايات المتحدة.

ادعى تسلا أن فكرته الأساسية ولدت عام 1882، لكن بعد هجرته إلى الولايات المتحدة، ألفى اهتماماً ضعيفاً بالتيار المتناوب من جانب أديسون، أول شخص أمريكي موظِف له. إلا أن تسلا لم يجد صعوبة في تأمين التمويل، ليتمكن بذلك من فتح شركته الخاصة عام 1887 وتقديم طلباته كافة للحصول على براءة اختراع، 40 منها كان بين عامي 1887 و1891. وعند تصميم محركه متعدد الأطوار، هدف تسلا إلى

> تحول اقتصادي أعظم حتى الآن لإنشاء جهاز بسيط رخيص وثابت، وأخيراً يجب أن يكون الجهاز سهل الإدارة، بحيث يمكن تجنب الأخطار كافة المرتبطة بتيارات التوتر العالي اللازمة لنقلها بتكلفة رخيصة. (تسلا 1888، 1)

اشترت شركة وستنجهاوس براءات اختراع تسلا كافة الخاصة بالتيار المتناوب في يوليو/تموز 1888. وفي عام 1889 كان لدى الشركة أول جهاز كهربائي يعمل بمحرك تسلا، وهو عبارة عن مروحة صغيرة (125 واط) تعمل بمحرك تيار متناوب باستطاعة 125 واطاً؛ وبحلول عام 1900 باعت من الجهاز قرابة 100.000 وحدة (هنتر وبرايانت 1991). وكانت أول براءة اختراع حصل عليها تسلا لمحرك ثنائي الشوط، أما أول تصميم ثلاثي الشوط فصنعه ميخائيل أوسيبوفيتش دوليفو دوبروفولسكي Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrowolsky أ(1862-1919)، وهو مهندس روسي يعمل لمصلحة شركة AEG. والمحركات ثلاثية الأشواط (كل طور يعادل 120o) تضمن بقاء واحد من هذه الأشواط دائماً عند ذروته، ما يعطي نتاجاً أكبر من الطاقة قياساً بتصميم المحرك ثنائي الشوط، ويصل إلى جودة المحرك رباعي الشوط

تقريباً، الذي يتطلب سلكاً آخر. لا شك في أن غزو الأسواق بالمحركات ثلاثية الشوط تسبب في تحول هائل في التصنيع، وهذا ما أشرحه في القسم التالي.

الابتكارات التقنية

إن التحول الهائل من وقود الكتلة النباتية الحيوية إلى الوقود الأحفوري ومن المحركات الرئيسة الحيوية إلى المحركات الرئيسة الميكانيكية أحدث تغييرات غير مسبوقة، من حيث نوعياتها الجديدة التي باتت سمة العصر ومن حيث وتيرة تبنيها. ففي عام 1800، عاش سكان باريس أو نيويورك أو طوكيو في عالم لم تختلف أسس الطاقة فيه عن تلك التي سادت عام 1700 فحسب، بل أيضاً عن نظيرتها لعام 1300: خشب، فحم نباتي، عمل شاق، حيوانات الجر كانت مصدراً للطاقة لدى تلك المجتمعات كافة. لكن في عام 1900، عاش الكثير من سكان المدن الغربية الرئيسة في مجتمعات تختلف فيها المعايير التقنية اختلافاً كاملاً عن نظيرتها التي سادت سائر أنحاء العالم عام 1800، والتي كانت، من حيث ملامحها الأساسية، أقرب إلى حياتنا عام 2000. وجاء في موجز للمؤرخ لويس مومفورد Lewis Mumford أ(1967، 294) أن «الطاقة والسرعة والحركة وتوحيد المقاييس والإنتاج بكميات كبيرة، وتحديد النوعية، والتنظيم والدقة والتجانس والانتظام الفضائي والتحكم، وفوق كل ذلك التحكم باتت كلمات المرور الخاصة بالمجتمع الحديث وفق الأسلوب الغربي الجديد».

وثمة أمثلة وافرة عن هذه التغيرات، اخترت منها بعض الإنجازات العالمية فقط لتوضيح قوة هذه المكاسب السريعة. فعلى أهم المستويات الرئيسة، استهلك العالم عام 1800 نحو 20 إكساجول من الطاقة (أي أقل من 500 ميغا طن من النفط الخام)، 98% منها كتلة حيوية نباتية، وعلى رأسها الخشب والفحم النباتي؛ وفي عام 1900 وصل إجمالي الإمداد بالطاقة الرئيسة إلى أكثر من الضعف (نحو 43 إكساجول، أي أكثر من 1 جيغا طن من النفط الخام)، جاء نصفها من الوقود الأحفوري، لاسيما الفحم. وفي عام 1800 ظهرت أقوى وسائط التحريك الأولية الميكانيكية حيث طور واط المحرك البخاري باستطاعة تجاوزت 100 كيلو واط؛ لترتفع هذه القيمة بمقدار 30 ضعفاً عام 1900، حيث وصلت استطاعة أكبر المحركات البخارية إلى 3 ميغا واط. وفي عام 1800 كان الفولاذ نادراً، وبحلول عام 1850 «عُرف بمحدودية كبيرة في كميته نسبياً داخل الوسط التجاري» حتى في المملكة المتحدة (بل 1884، 435)، حيث انتجت بضع مئات الآلاف من الأطنان منه على مستوى العالم، إلا أن الإنتاج العالمي من الفولاذ في عام 1900 بلغ 28 ميغا طن (سميل 2016).

لكن لاحظوا عبارات الحذر والتحفظ التي استخدمتها مثل و«من حيث ملامحها الأساسية» عند وصف العالم سنة 1900. فقد كان التحول الذي تحقق، على مستوى النوعية والكمية، تحولاً عميقاً بوتيرة أثارت الدهشة في العادة. وفي الوقت عينه، كان عالم الوقود الأحفوري ووسائط التحريك الأولية الميكانيكية لا يزال جديداً لم ينضج بعد، إذ كثيراً ما وصف بغياب كبير للكفاءة وارتبط

بكثير من التأثيرات البيئية السلبية. وفي عام 1900 طغت على الولايات المتحدة وفرنسا صفة المجتمعات المعتمدة على الوقود الأحفوري، إلا أن العالم بأكمله بقي آنذاك يستمد نصف طاقته الأساس من الخشب والفحم النباتي ومخلفات المحاصيل، وحتى الولايات المتحدة انتظرت 17 عاماً لتصل إلى العام الذي بلغ فيه عدد خيول الجر ذروته. صحيح أن المصابيح المتوهجة والمحركات الكهربائية والهواتف حققت تقدماً سريعاً، إلا أن جلّ الكهرباء التي استخدمتها الأسر الحضرية في الولايات المتحدة أو ألمانيا اقتصرت على تغذية بضعة مصابيح إنارة بالطاقة.

مع ترسخ أسس عالم الطاقة الجديد، شهدت مكونات هذا النظام الناشئ كافة في القرن العشرين تحولاً هائلاً نتيجة مزيج من النمو السريع والتطورات النوعية، التي طالت بصفة رئيسة الكفاءة والإنتاجية والثبات والسلامة والتأثير البيئي. إلا أن هذا التطور شهد انقطاعاً إثر اندلاع الحرب العالمية الأولى، ليتوقف مرة أخرى متأثراً بالأزمة الاقتصادية التي ألمت بثلاثينيات القرن العشرين. أما الحرب العالمية الثانية فقد سرّعت من تطور الطاقة النووية وإدخال العنفات الغازية (المحركات النفاثة) والدفع الصاروخي. إلا أن استئناف النمو في أعقاب عام 1945 على مستويات صناعات الطاقة كافة وصل إلى ذرى جديدة في مطلع سبعينيات القرن العشرين، وبالتالي نمو الكثير من تقنيات الطاقة بشكل ملحوظ، اقترن غالباً بزيادة الإنتاجية. ومن الأمثلة على ذلك الزيادات التي شهدتها استطاعة العنفات البخارية، وحمولة ناقلات النفط الأنموذجية العملاقة، وتصنيفات خطوط نقل التيار المتناوب عالي الجهد.

لم يكن لهذا الركود ارتباط كبير بالمعوقات التقنية، بل جاء نتيجة التكاليف المعوقة والتأثيرات البيئية غير المقبولة. أما العامل المهم الآخر الذي أسهم في إضعاف وتيرة التطور على مستوى الطاقة فجاء نتيجة فترتين (1973-1974، 1979-1980) من الارتفاع السريع في أسعار النفط بقيادة منظمة الأقطار المصدرة للنفط (أوبك) وتأثير هذا الارتفاع في تراجع استهلاك الطاقة. لذلك، بات رفع مستوى الكفاءة والاعتمادية والتوافق البيئي أهدافاً هندسية جديدة. إلا أن أسعار الطاقة سجلت استقراراً في نهاية المطاف، ليشهد الاقتصاد الأمريكي، الذي لا يزال الأكبر على مستوى العالم، عقداً آخر من التوسع اتسم بقوته في تسعينيات القرن العشرين، ونجم عنه تعزيز الروابط مع الصين.

بعد عقود البؤس الماوية، طبق أكثر بلاد العالم سكاناً سياسات إصلاحية زادت استهلاك الفرد للطاقة الأولية بنحو أربعة أضعاف بين عامي 1980 و2010: ففي عام 2009 باتت الصين أكبر مستهلك للطاقة على مستوى العالم (حيث سبقت الولايات المتحدة بنسبة 30% عام 2015). أما معدل استهلاك الفرد للطاقة في عام 2015 في الصين والذي بلغ نحو 95 جيغا جول فكان مماثلاً لنظيره في فرنسا في مطلع سبعينيات القرن العشرين، إلا أن الاستخدام الصناعي لا يزال هو المهيمن، وبقي استخدام الصين للطاقة في المناطق السكنية أدنى بالمقارنة مع الغرب في مرحلة مماثلة من مراحل التطور. وبحلول عام 2015 شهدت معدلات النمو في الاقتصاد الصيني والطلب على الطاقة تباطؤاً محتوماً، لكن يأمل البلايين من سكان الهند وجنوب شرق آسيا وأفريقيا بتكرار النجاح الذي حققته الصين، حيث سيضاف أكثر من ملياري شخص إلى إجمالي العدد المسجل عام 2015 بحلول عام 2050.

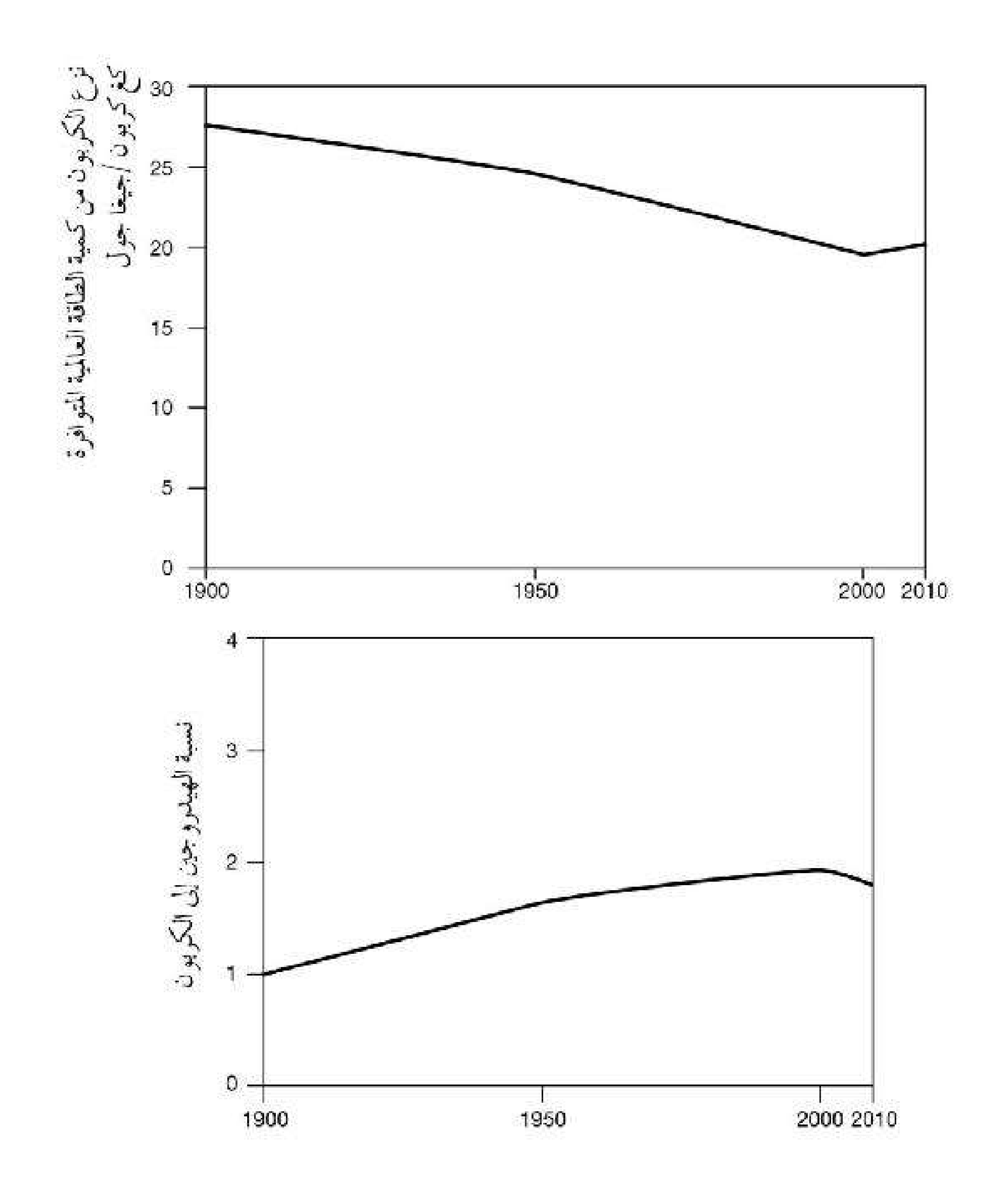
لا شك في أن استمرارية ارتفاع الطلب على الطاقة يعد حقيقة واقعة، لكن لا يمكن لأحد منا التنبؤ بكيفية تلبية هذا الطلب في عالم يسوده انعدام المساواة الاقتصادية والمخاوف المرتبطة بالبيئة العالمية. وهنالك الكثير من التنبؤات والسيناريوهات، إلا أن تاريخ التطورات على مستوى الطاقة أظهر أن الإخفاق في التنبؤ هو السمة العامة (سميل 2003). وفي هذا القسم، أستعرض وألخص الاتجاهات الرئيسة التي أسهمت في تحديد التوسع والنضج والتحولات التي شهدها استخراج النفط وتصنيعه وتوصيله، وكذلك التطورات على مستوى توليد الكهرباء اعتماداً على الطاقة الحرارية المتجددة، كما أستعرض وألخص التركيبة والأداء المتغير لوسائط التحريك الأساسية الميكانيكية، لكن قبل القيام بذلك عليَّ أن أشير بشيء من التفصيل إلى العديد من العوامل المشتركة التي ميزت إنتاج الوقود الأحفوري وتوليد الكهرباء وانتشار وسائط التحريك الأولية.

وُصف استخراج الوقود الأحفوري في الفترة ما بعد 1900 بثلاثة اتجاهات ملحوظة، أولها التوسع في استخراج الفحم من المناجم عالمياً، وزيادة كمية استخراج الكربون الأحفوري سنوياً - إثر إنتاج الهيدروكربونات - بنحو 20 ضعفاً بين عامي 1900 و2015، وذلك من 500 ميغا طن عام 1900 إلى 6.7 جيغا طن بعد قرن من الزمن، وإلى قرابة 9.7 جيغا طن عام 2015 (أوليفير 2014؛ بودن وأندريه 2015؛ للتعبير عن إجمالي حجم غاز CO2 اضربه بـ 3.67). ونظراً لانعدام المساواة في توزيع الوقود الأحفوري، فقد أدى اتساع نطاق استخراجه إلى ظهور حتمي لتجارة حقيقية على المستوى العالمي للنفط الخام الذي يتسم بسهولة نقله، فضلاً عن ارتفاع صادرات الفحم والغاز الطبيعي (عبر الأنابيب وناقلات الغاز الطبيعي المسال). إلا أن نظرة عن كثب تكشف بعضاً من المؤهلات والاستثناءات المهمة، حيث إن ارتفاعها على المستوى العالمي انعكس على الكثير من الاتجاهات المعقدة على المستوى الوطني، بما فيها الاتجاهات الخاصة بتراجع الإنتاج بشكل ملحوظ أو التوقف الكامل عن استخراج الوقود.

ثانياً، كانت التطورات التقنية العديدة أهم العوامل التي ساعدت على حدوث هذا التوسع، ما أدى إلى اعتماد طرائق أرخص وأعلى إنتاجية لاستخراج الوقود ونقله وتصنيعه، فضلاً عن الحد من معدلات التلوث النوعي (وحتى خفض الانبعاثات العالمية المطلقة، كإحدى الحالات الملحوظة).
ثالثاً، ظهر تحول مادي واضح نحو الحصول على وقود أجود، أي من الفحم إلى النفط الخام والغاز الطبيعي، وهي عملية أدت إلى نزع الكربون (رفع نسبة الهيدروجين إلى الكربون H:C) عند استخراج الوقود الأحفوري عالمياً، بينما كانت المستويات المطلقة لانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي تشهد ارتفاعاً باستثناء بعض حالات التراجع الطفيف التي سجلت لفترة مؤقتة سنوياً. وتتباين نسبة الهيدروجين إلى الكربون عند احتراق الخشب، إلا أنها لا تتجاوز 0.5، بينما تبلغ هذه النسبة 1.0 بالنسبة إلى الفحم و1.8 إلى البنزين والكيروسين، و4.0 إلى الميثان، المكون الأساسي للغاز الطبيعي.

وعند المقارنة على أساس محتوى الطاقة، نجد أن الوقود عالي الكربون (الخشب والفحم) أعطى نسبة 94% من الطاقة على مستوى العالم في عام 1900، و73% في عام 1950، لينخفض هذا الرقم إلى 38% بحلول عام 2000 (سميل 2010أ). نتيجة لهذا، استمر تراجع معدل الكربون الناتج عن الإمداد العالمي بالوقود الأحفوري: فعند التعبير عنه من حيث الكربون في وحدة إجمالي

الإمداد بالطاقة الأولية على مستوى العالم، نجده قد تراجع من نحو 28 كربون/جيغا جول عام 1900 إلى أقل من 25 عام 1950، وإلى أعلى قليلاً من 19 عام 2010، أي ما يشكل انخفاضاً بنسبة 30% تقريباً. لكن نتيجة الارتفاع السريع الذي شهدته الصين على مستوى إنتاج الفحم في الصين، ارتفع بشكل طفيف في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين (الشكل 5-12). وفي الوقت عينه، ارتفعت انبعاثات الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري على المستوى العالمي من مجرد 534 ميغا طن كربون عام 1900 إلى 1.63 جيغا طن عام 1950، وإلى 6.77 جيغا طن عام 2000، وإلى 9.14 جيغا طن كربون عام 2010 (بودن



الشكل 5-12

نزع الكربون من التغذية بالطاقة الأولية على المستوى العالمي في الفترة 1900-2010. المخطط مقتبس من بيانات سميل (2014ب).

Boden وأندريه Andres ومارلاند Marland أ2016).

جمع توليد الكهرباء بين التطورات التقنية وانتشارها على نطاق كبير على مستوى المكان، إلا أن هذا الانتشار تأخر حتى في بعض مناطق الولايات المتحدة، بينما لا يزال بعيد المنال في كثير من الأمم كثيرة السكان، فقد بدأت هذه العملية بشبكات صغيرة معزولة لتتطور لاحقاً إلى شبكات ضخمة: في أوروبا تشمل هذه الشبكات كامل القارة، كما أن لدى روسيا شبكة واسعة النطاق، ومنذ 1900 أنشأت الصين كثيراً من الوصلات الممتدة على مسافات طويلة. ومن البلدان ذات الاقتصادات عالية الدخل تبقى الولايات المتحدة وكندا الوحيدتين من دون شبكات متكاملة على مستوى البلد. أما آخر التحولات المؤثرة في هذه الصناعة فهو تركيب العنفات الهوائية، والخلايا الكهرضوئية، ومحطات الطاقة الشمسية المركزية التي تلقى رواجا ودعماً بوصفها طاقة متجددة (مقابل الطاقة الكهرمائية التي صارت شكلاً قديماً من أشكال توليد الطاقة المتجددة)، حيث شهدت بعض الإضافات إلى استطاعتها، إلا أن الانقطاعات التي لاتفارقها وانخفاض عوامل استطاعتها مشكلات لا يستهان بها عند التفكير بضمها إلى الشبكات القائمة.

الفحم

شهد إنتاج الفحم على المستوى العالمي اتجاهين تمثلا في تنامي الاعتماد على الآلات لاستخراج الفحم من تحت الأرض وارتفاع نسبة استخراج الفحم من مناجم سطحية. وقد شهدت الإنتاجيات الأمريكية، الأعلى على مستوى العالم، زيادة من أقل من 1 طن فحم لكل عامل منجم في وردية واحدة عام 1900 إلى معدل ساعي على مستوى البلد يبلغ نحو 5 أطنان للعامل، وبمعدلات نوعية تتراوح من 2 إلى 3 أطنان/سا في مناجم أبلاتشيان Appalachian الباطنية إلى نحو 27 طناً/ سا في المناجم السطحية لحوض نهر باودر في مونتانا وويومينج (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2016أ). ولعل ما حقق إنتاجيات مرتفعة أيضاً كان استخراج عروق فحم الليغنيت (الفحم البني) من مستويات سطحية في أستراليا وألمانيا. وكان الفحم المستخدم من هذه المناجم الضخمة يحرق بوتيرة متزايدة في محطات طاقة مجاورة (عند باب المنجم). أما نقله إلى أسواق بعيدة فكان يتم بوساطة قطارات خاصة مؤلفة من أكثر من 100 عربة ضخمة خفيفة الوزن وقمعية الشكل متصلة ببعضها وتجرها قاطرات جبارة (خيرا Khaira أ2009).

كذلك شهد استهلاك الفحم اتجاهين أساسين، إذ إن خسائر أسواقه التقليدية المتمثلة في الميدان الصناعي والمنزلي والنقل نجمت عن المكاسب التي وفرتها الكهرباء التي تولد اعتماداً على الفحم (وبدرجة أقل بفعل ارتفاع إنتاج فحم الكوك المعدني واستخدام الفحم لتغذية التركيبات الكيميائية). فالفحم الذي استخدمته الأسر للتدفئة والطبخ استبدل ببدائل أنظف وأكفأ، وعلى رأسها الغاز الطبيعي والكهرباء ليبقى الفحم الوقود الأساسي في النقل في النصف الأول من القرن العشرين، إلا

أن تحول القاطرات والسفن إلى محركات الديزل (والذي بدأ في العقدين الأول والثالث على التوالي من القرن المذكور) شهد تسارعاً في أعقاب الحرب العالمية الثانية، بينما زودت القطارات السريعة كافة بمحركات كهربائية، (كان أولها قطار شينكانسن في اليابان عام 1964، وقطار TGV الفرنسي عام 1978 وغيرها من القطارات الأوروبية والآسيوية).

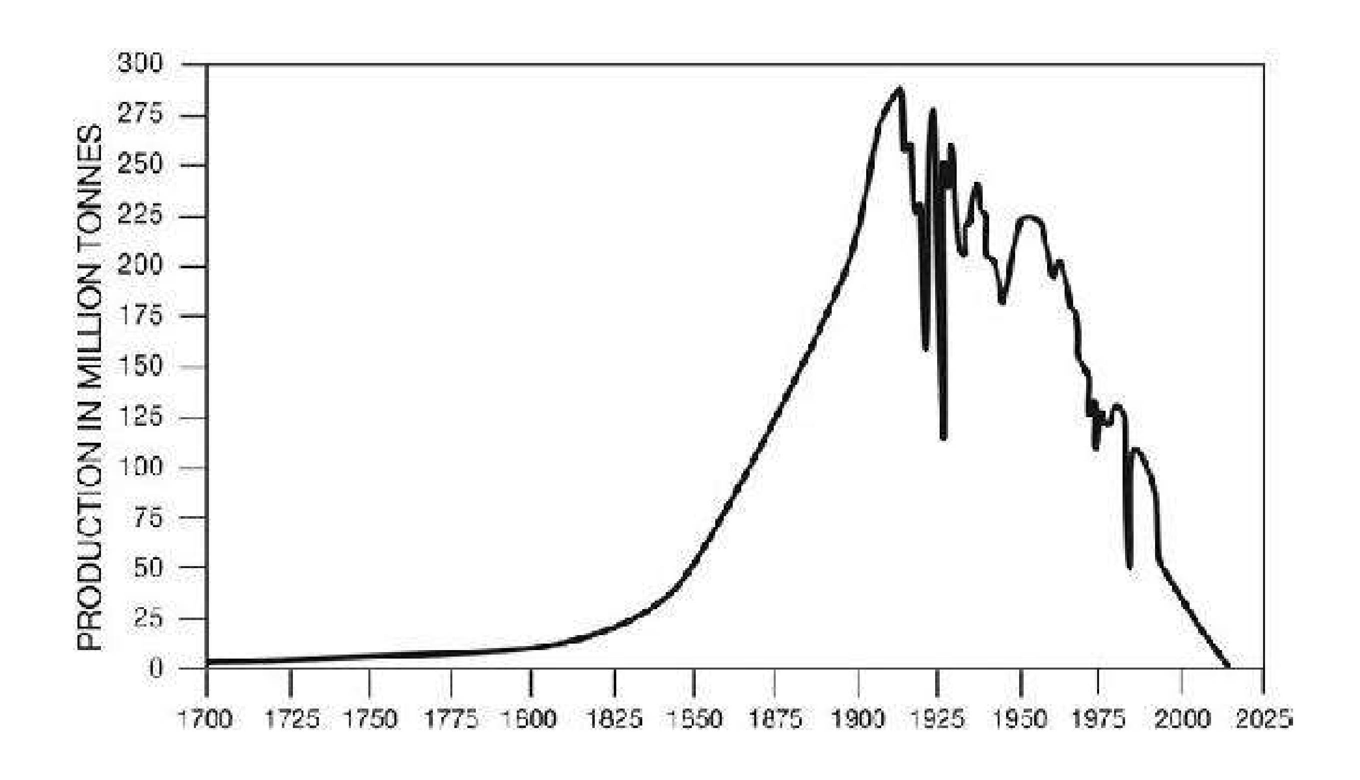
عمل احتراق الفحم على توليد الكهرباء الحرارية في ثمانينيات القرن التاسع عشر، وفي كل من بلدان مناجم الفحم التقليدية، وازداد الاعتماد على الفحم بإنشاء محطات الطاقة المركزية الضخمة بعد الحرب العالمية الثانية، وذلك عندما أدت زيادة استخراج الفحم من مناجم سطحية إلى توفير الفحم بكلفة زهيدة. وفي خمسينيات القرن العشرين، كان توليد الكهرباء بحرق الفحم هو الأعلى في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة وألمانيا وروسيا واليابان. واكتسب زيت الوقود أهمية في ستينيات القرن العشرين، إلا أن جل البلدان توقفت عن استخدامه في توليد الكهرباء بعد أن رفعت أوبك أسعار النفط في سبعينيات القرن العشرين، ليبقى الاعتماد على الفحم مرتفعاً في كل من الصين والهند والولايات المتحدة. وشهد الاستخدام النوعي لفحم الكوك المعدني (كغ من الكوك/كغ من المعدن الساخن) تراجعاً لعقود من الزمن، إلا أن تزايد صهر حديد الصب على مستوى العالم، من 30 ميغا طن عام 1900 إلى نحو 1.2 جيغا طن عام 2015 أسهم بزيادة إنتاج فحم الكوك إلى نحو 1.2 جيغا طن (سميل 2016).

سجلت تواريخ الفحم الوطنية كثيراً من التطورات، منها ما هو متوقع ومنها ما هو مفاجئ، بما في ذلك انتهاء عمليات استخراج الفحم في البلد الرائد على مستوى استخراج الوقود (الشكل 5-13). وصل الإنتاج البريطاني إلى ذروته بكمية 292 ميغا طن عام 1913، حيث لم يقتصر الإمداد بالطاقة المستمدة من الفحم على الصناعات البريطانية فحسب، بل طال توسعاتها في القرن التاسع عشر على امتداد إمبراطوريتها الاستعمارية، ناهيك عن إمبراطوريتها التجارية من خلال الهيمنة التي فرضتها قواتها البحرية وكذلك الشحن التجاري. وفي 1947، وهو العام الذي أممت به حكومة العمال الصناعة وشكلت المجلس الوطني للفحم، كان الإنتاج لا يزال عند كمية 200 ميغا طن تقريباً (سميل 2010أ). أما الذروة ما بعد الحرب فسجلت عام 1952 (وكذلك عام 1957) بكمية 228 ميغا طن، لكن مع ارتفاع كمية الواردات من النفط الخام، وتوافر النفط والغاز الطبيعي في بحر الشمال بعد عام 1970، أقدم البلد على تخفيض اعتماده على الفحم إلى النصف بحلول عام 1980.

وخلال الإضراب الطويل لعمال مناجم الفحم عام 1984، تراجع إجمالي الإنتاج إلى 51 ميغا طن، تبع ذلك فترة وجيزة من التعافي، ليعاود تراجعه الذي استمر بعد الخصخصة مجدداً عام 1994 (سميل 2010أ). وفي عام 2000 انحصر الإنتاج بكمية 31 ميغا طن، وفي يوليو/تموز 2015 أعلنت شركات الفحم القابضة في المملكة المتحدة عن إقفالها الفوري لمنجم ثوريسبي Thoresby للفحم، وإنهاء الأعمال في كيلينجلي Kellingley آخر المناجم البريطانية في ديسمبر/كانون الأول من عام 2015 (جاسمين 2015). فبعد 400 عام من إمداد البلد بالطاقة، تحولت الصناعة التي جعلت من بريطانيا عظيمة على المستويين الاقتصادي والاستراتيجي (والتي وصلت ذروة التوظيف فيها في مطلع عشرينيات القرن العشرين إلى 1.2 مليون عامل أو نحو

7% من إجمالي قوة العمل) إلى بضعة متاحف، وجولات إلى باطن الأرض يقودها دليل سياحي (المتحف الوطني لاستخراج الفحم 2015).

بلغت كمية الفحم الأمريكي المستخرجة 508 ميغا طن عام 1950، لكنها وصلت



الشكل 13-5

الإنتاج البريطاني من الفحم في الفترة 1700-2015. المخطط مستمد من بيانات نِف Nef أ(1932) ودائرة الطاقة والتغير المناخي (2015).

إلى ذروتها عام 2001 بكمية 1.02 جيغا طن. وفي تلك الفترة، خسر الفحم أسواقه كافة المتعلقة بالنقل وقرابة جميع أسواقه المتعلقة بالاستخدام المنزلي، كما تراجع إنتاج فحم الكوك أيضاً، لكن بالمقابل اتسع نطاق الصادرات. فاليوم بات أكثر من 90% من جميع شحنات الفحم تحرق في محطات الطاقة الحرارية: ففي عام 1950 ولدت الولايات المتحدة 46% من كهربائها اعتماداً على الفحم، لترتفع النسبة إلى 52% بحلول عام 1990، وتبقى محافظة على هذا المستوى من الارتفاع لأكثر من عقد من الزمن. وفي عام 2010 وصلت النسبة إلى 45%، لكن بحلول 2015 (العام الذي أغلقت فيه المحطات القديمة العاملة بوقود الفحم، وتوافر فيه الغاز الطبيعي

بكميات كبيرة) تراجعت إلى 33% (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة، 2015أ). وتفوق الإنتاج الصيني من الفحم على نظيره الأمريكي عام 1985، حيث بات الفحم أكثر أنواع الوقود المزودة بالطاقة اللازمة لنمو الاقتصاد الصيني غير العادي (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة، 2015ب؛ مربع 5-12).

تفوق الاتحاد السوفييتي على الولايات المتحدة في إنتاج الفحم حتى عام 1983، لكن الاستخراج الروسي للفحم تراجع بعد انهيار الاتحاد، وسد الغاز الطبيعي والنفط الخام الاحتياجات المطلوبة. واليوم، تعد الهند ثالث أكبر منتج على مستوى العالم (حيث بلغ إنتاجها عام 2014 سدس الإنتاج الصيني فقط)، إلا أن نوعية الفحم الذي تنتجه الهند أدنى بأشواط قياساً بالفحم الصيني والأمريكي، ناهيك عن أن إنتاجية استخراج الفحم لا تزال عند مستويات تدعو للتشاؤم. وتأتي إندونيسيا وأستراليا (المُصدّران الرئيسان) ليكملا قائمة البلدان الخمسة الأولى في إنتاج الفحم، لتحل من بعدهما روسيا وجنوب أفريقيا وألمانيا وبولندا وكازاخستان، في حين صارت بعض البلدان الرئيسة المنتجة للفحم سابقاً، بما فيها ألمانيا والمملكة المتحدة، بلداناً مستوردة للفحم بكميات كبيرة.

نظراً لأن الوقود يولد كماً أكبر من غاز ثاني أكسيد الكربون في وحدة الطاقة التي يتم إطلاقها قياساً بأي وقود أحفوري آخر، فإن النسب الأنموذجية تبقى أكبر من 30 كغ كربون/جيغا جول للفحم، ونحو 20 كغ كربون/ جيغا جول للهيدروكربون السائل، وأقل من 15 كغ كربون/ جيغا جول للغاز الطبيعي، ما يجعل مستقبله مبهماً في عالم يهتم بالارتفاع السريع لحرارة الأرض. ولعل الاعتماد الكبير على الفحم لتوليد الكهرباء في الصين والهند وما لا يقل عن 12 بلداً غيرها يقف عائقاً أمام التخلي السريع عن الوقود، لكن على المدى الطويل، قد يكون الفحم المصدر الرئيس للطاقة، وسيكون استخراجه محدوداً بسبب المخاوف المرتبطة بالبيئة، رغم وفرة مصادره حتى يومنا هذا.

الهيدروكربونات

في مطلع القرن العشرين كان إنتاج النفط مقتصراً على عدد محدود من البلدان، في حين وفر الوقود 3% فقط من إجمالي الطاقة المستمدة من الوقود الأحفوري، لكن بحلول عام 1950 ارتفعت النسبة إلى نحو 21%، ليتفوق محتوى الطاقة التي يوفرها النفط الخام على الفحم في عام 1964، حيث وصلت النسبة إلى ذروتها عام 1972 مسجلة بذلك نحو 46% من إجمالي الوقود الأحفوري. ولعل كلا الانطباعين الشائعين -بأن القرن العشرين هيمن عليه النفط، مثلما هيمن الفحم على القرن التاسع عشر- كان خاطئاً. إذ كان الخشب الوقود هو الأهم قبل عام 1900، بينما ظل الفحم يهيمن على القرن العشرين بصورة عامة (سميل 2010أ). وتظهر أفضل حساباتي تقدم الفحم على النفط الخام بنسبة 15% (5.2 يوتا جول مقابل 4 يوتا جول)، وحتى عند إدخال استخدامات غير ذات صلة بالطاقة للنفط المصنع (كمواد للتزليق أو تعبيد الطرقات) يبقى الفحم متفوقاً على الهيدروكربونات السائل، أو نظراً للضبابية التي تكتنف تحويل الكميات المستخرجة

إلى مكافئات طاقة شائعة، يبقى الإنتاج التراكمي من كلا الوقودين للقرن العشرين عند مستوى شبه متساوٍ.

إلا أن الوقود السائل المشتق عن النفط الخام يتفوق على الفحم، فبينما تقلصت سوق الفحم في القرن العشرين (كما أظهرنا آنفاً للتو) وانحصارها في قطاعين رئيسين: توليد الكهرباء والكوك، كانت سوق الهيدروكربونات السائل تشهد اتساعاً مطرداً، من خلال البدائل ومن خلال نشوء قطاعات استهلاكية رئيسة جديدة. أما البدائل الرئيسة فأدت إلى التخلي عن الفحم لمصلحة زيت الوقود وزيت الديزل في السفن (حيث بدأت قبل الحرب العالمية الأولى، لتتسارع في عشرينيات القرن الفائت) وتلتها الخطوط الحديدية (والتي بدأت في عشرينيات القرن الماضي) وزيت الوقود (ومن ثم الغاز الطبيعي) في تدفئة المنشآت الصناعية والمؤسسات والمنازل، وبالهيدروكربونات السائل والغازي كمادة أولية لصناعة البتروكيماويات (بعد الحرب العالمية الثانية).

أنشئت أول سوق جديدة من خلال إدخال سيارات بأسعار مقبولة، بدءاً بطراز T من سيارات فورد قبل الحرب العالمية الأولى، والزيادة السريعة في تملك السيارات بعد الحرب العالمية الثانية؛ أما السوق الثانية فبدأت بإدخال المحركات النفاثة في الطيران التجاري في خمسينيات القرن الماضي، وهو ابتكار تسبب في نقل الطيران

مربع 5-12

إنتاج الفحم الصيني

بعد أن شكل الحزب الشيوعي الصيني نظاماً جديداً في الأول من أكتوبر/تشرين الأول 1949، عمد إلى تغذية التحول الصناعي الستاليني بالطاقة المستمدة من رواسب الفحم الوفيرة في الصين رغم عدم انتظام توزعها. وفي العقود اللاحقة تراجع الاعتماد النسبي للبلد على الفحم لكن إجمالي استخدامه وصل إلى مستويات قياسية (سميل 1976؛ تومسون Thomson أ2003؛ فريق الطاقة الصيني 2014؛ الرابطة العالمية للفحم 2015). وارتفع إنتاج الفحم من 32 ميغا طن تقريباً عام 1949 إلى 130 ميغا طن عام 1957، ووصل بحسب الادعاءات إلى نحو 400 ميغا طن عام 1960، وذلك في حركة أطلقها ماو تسي تونج Mao Zedong بعنوان «قفزة عظيمة نحو الأمام» واتسمت بسمعة سيئة لما أسفرت عنه من مجاعة بهدف التفوق على بريطانيا في فترة 15 عاماً أو أقل في مجال إنتاج الحديد والفولاذ وغيرهما من المنتجات الصناعية الأساسية (هوانج 1958). وعقب تعثر «القفزة» والسقوط، أدى التقدم الذي أحرزته الصين بخطوات منتظمة إلى زيادة إنتاجها من الفحم إلى أكثر من 600 ميغا طن بحلول عام 1978، وذلك بالتزامن مع بدء دينج شياو بينغ إصلاحاته الاقتصادية واسعة النطاق، والتي حولت الصين إلى أكبر بلد مُصدّر للبضائع المصنعة على مستوى العالم، ورفع مستوى المعيشة لسكانها البالغ عددهم نحو 1.4 مليار نسمة.

إلا أن شيئين لم يتغيراً في البلد، الأول إحكام سيطرة الحزب على زمام الدولة، والثاني اعتماد الاقتصاد على الفحم. لكن الاعتماد النسبي على الفحم تراجع من أكثر من 90% عام 1955 إلى 67% عام 2010، كما تراجعت أيضاً نسبة الكهرباء التي تولد من حرق الفحم في الصين، مع بقائها أعلى من 60%. بيد أن إجمالي إنتاج الصين من الفحم سجل ارتفاعاً بأكثر من أربعة أضعاف بين 1980 (907 ميغا طن) و2013 (3.97 جيغا طن)، عندما اقترب من إجمالي إنتاج العالم بأسره. أما سنة 2014 فكانت السنة التي شهد فيها استخراج الفحم تراجعاً بنسبة 2.5%، تبعه انخفاض آخر عام 2015 بنسبة 3.2، إلا أن الكمية الحقيقية لإجمالي الإنتاج تبقى مبهمة: ففي سبتمبر/أيلول 2015، أقدم المكتب الوطني للإحصاء في الصين على زيادة قيم بياناته السابقة المتعلقة باستخراج الفحم سنوياً بين 2000 و2013، وذلك من دون تقديمه لأي تفسير بهذا الشأن. ولعل الإنتاج الهائل من الفحم كان المصدر الرئيس وراء الوفيات المهنية وأكبر مصدر لمستويات تلوث الهواء المرتفعة على نحو مخيف، حيث وصلت مستويات الجسيمات الصغيرة (<2.5 ميكرومتر) إلى مستوى يفوق الحد الأقصى المسموح به (سميل 2013ب).

من صناعة باهظة التكاليف وتجربة نادرة إلى صناعة عالمية عامة (سميل 2010ب). ويمكن لصناعة النفط أن تلبي الطلب المتزايد لما تتسم به من تطورات تقنية متعددة أثرت في كل جانب من جوانب تشغيلها. ففي قائمة تقتصر على التطورات الأساسية فقط في القرن العشرين نجد أن هنالك ما يربو على 12 بنداً (سميل 2008أ).

يجب أن تبدأ القائمة بالتطورات التي طرأت على التوقعات الجيوفيزيائية، إذ تشتمل هذه التطورات على فكرة قياسات الناقلية الكهربائية (1912)، وإنشاء سجل جيد حول المقاومة الكهربائية (1927) لتحديد البنى تحت السطحية الحاملة للهيدروكربون، والكمون الذاتي (1931) وسجل خاص بالتحريض (1949) الذي أدخله كونراد شلومبيرجر (1878-1936) وأقاربه، والذي بلغ كماله لاحقاً من خلال شركة حملت اسمه وأسماء مستكشفين آخرين للنفط والغاز (سميل 2006). وللحديث عن التطورات التي شهدها استخراج النفط يجب أن نأتي أولاً على ذكر الاعتماد العالمي على طريقة الحفر الدوراني (التي استخدمت لأول مرة في نبع سبندلتوب في بيومونت، تكساس عام 1901؛ انظر الشكل 5-6)، ومن ثم إدخال قطعة حفارة الصخور الدوارة من قبل هوارد هيوز (1905-1976) عام 1909، واختراع المثقاب ثلاثي المخاريط عام 1933، والتطورات على مستوى مراقبة وتنظيم تدفق النفط ومنع انفجار الآبار. ولعل الاعتماد بصورة متزايدة على طرائق استخراج النفط من المستوى الثانوي والثالثي (باستخدام المياه وغيرها من السوائل أو الغازات لدفع النفط نحو السطح بكمية أكبر) أطالت من عمر الآبار وزادت من إنتاجيتها التي كانت عادة جدّ منخفضة (حيث استخرجت كمية متدنية لا تتجاوز 30% من النفط الموجود في الموقع).

تتزايد نسبة إنتاج النفط من الآبار البحرية القريبة من الشاطئ. إذ كان حفر هذه الآبار اعتماداً على الأرصفة البحرية شائعاً في كاليفورنيا عام 1900. إلا أن أول بئر استكملت بحيث لا يمكن رؤيتها من اليابسة عام 1947 كانت في المياه المقابلة لولاية لويزيانا. وتعمل المنصات البحرية (نصف

المغمورة) في مياه يتجاوز عمقها 2.000 م. وتتدرج منصات الإنتاج التي تم نصبها في حقول بحرية رئيسة بين أكبر البنى التي تم إنشاؤها حتى اليوم. أما أحدث التطورات على صعيد الإنتاج فتكمن في زيادة استخراج النفط من مصادر غير تقليدية للنفط الخام، بما في ذلك النفط الثقيل (في كثير من بقاع العالم)، والنفط المدمج مع الرمل القاري (ألبيرتا، فنزويلا)، وكذلك استخراج النفط بطريقة التكسير الهيدروليكي لإنتاج النفط من طبقة الطفل (الصخر الزيتي). وقد أثبتت الطريقة المذكورة - والتي كانت رائدة في الولايات المتحدة - نجاحاً كبيراً أعاد أمريكا إلى مرتبة أكبر منتج للنفط الخام وغيره من السوائل النفطية على مستوى العالم. لكن إذا ما أخذنا بعين الاعتبار النفط الخام فقط، وجدنا أن المملكة العربية السعودية كانت تتقدم قليلاً عنها عام 2015 بإنتاج وصل إلى 568.5 جيغا طن قياساً بكمية 567.2 جيغا طن للولايات المتحدة.

تحوّل نقل النفط الخام من أنابيب فولاذية غير ملحومة إلى أنابيب واسعة يمكن في نهاية الأمر مدها بين القارات. وهذه الأنابيب هي الأقوى والأثبت والأنظف، وهي الأنموذج الآمن لنقل النفط بكميات كبيرة عبر اليابسة. فالخطوط الأمريكية التي تنقل النفط الخام من الخليج إلى الساحل الشرقي، والتي مُدت خلال الحرب العالمية الثانية، تراجعت في سبعينيات القرن الفائت أمام أطول نظام على مستوى العالم صُمم لنقل النفط الخام من غربي سيبيريا إلى أوروبا. وينقل الخط المعروف باسم أوست باليك كورغان ألمتيفسك Ust-Balik-KurganAlmetievsk (بقطر 120 سم وبطول 2.120 كم) سنوياً كمية تصل حتى 90 ميغا طن من النفط الخام الذي ينتجه حقل النفط العملاق ساموتلور Samotlor إلى الطرف الأوروبي من روسيا، ومن ثم ينقل النفط عبر خطوط فرعية كبيرة القطر بطول 2.500 كم إلى أسواق أوروبية غربية تصل حتى ألمانيا وإيطاليا. وقد أدى الطلب على واردات النفط إلى أوروبا واليابان في أعقاب الحرب العالمية الثانية إلى نمو سريع في أحجام ناقلات النفط (راتكليف 1985). الأمر الذي حول النفط إلى سلعة عالمية ميسورة التكلفة، وباتت المسافة الفاصلة بين المنشأه والمستخدم النهائي مسألة اقتصادية ثانوية، مع مبيعات سنوية من النفط الخام عبر القارات تجاوز 2 جيغا طن (مربع 5-13).

ولعل التطور الوحيد والأهم في عملية التصفية كان تكسير روابط النفط الخام باستخدام الوسيط. فقد كان التكسير الحراري الطريقة السائدة حتى 1936، وذلك إلى أن بدأ يوجين هودري (1892-1962) بإنتاج البنزين عالي الأوكتان، وهو الوقود الأساسي للسيارات، وذلك في مصفاة صن أويل Sun Oil للنفط في بنسلفانيا في أول وحدة لتكسير روابط النفط الخام بطريقة الوسيط. وقد أتاحت هذه الطريقة إنتاج نسب أكبر من منتجات ذات قيمة أعلى (أخف) (كالبنزين والكيروسين) من مكونات متوسطة أو ثقيلة. وبعد فترة قصيرة، بات بالإمكان توليد وسيط جديد متنقل القاعدة من دون التوقف عن الإنتاج، كما أمكن إنتاج نوعيات أفضل من البنزين عالي الأوكتان باستخدام مسحوق وسيط منقول جوا (سميل 2006). وفي خمسينيات القرن الماضي، عمل التكسير الهيدروليكي تحت ضغط مرتفع نسبياً على تكميل التكسير باستخدام وسيط سائل، حيث لا تزال هاتان التقنيتان هما المتبعتان بشكل رئيس في عملية تكرير النفط بطرق حديثة. كما استفادت عملية التصفية أيضاً من نزع الكبريت عن الوقود السائل، ما جعل استخدام الوقود الملوث كزيت الديزل مقبولاً في سيارات الركاب ذات الانبعاثات المنخفضة (CDFA، ا2015).

تمخض ذلك كله عن أربع نتائج مهمة. الأولى، نمو الإنتاج العالمي للنفط بنحو 200 ضعف في القرن العشرين. ففي عام 2015 كان أعلى بنحو 20% قياساً بعام 2000 (بكمية تربو على 4.3 جيغا طن)، ومنذ عام 1964 عندما تفوق محتواه من الطاقة على نظيره من الفحم المستخرج، بات النفط هو الوقود شائع الاستخدام. والثانية، ينتج

مربع 5-13

ناقلات النفط العملاقة

دخلت أول ناقلة نفط ألمانية من صنع بريطاني تحمل اسم غلوكاوف Glückauf الخدمة عام 1886، بوزن قائم بلغ 2.300 طن (موقع تاين لبناء السفن 2015). أما النمو التالي فرفع الحمولة القصوى لناقلة النفط إلى نحو 20.000 طن مع مطلع عشرينيات القرن الفائت. وخلال الحرب، وصلت حمولة ناقلات النفط الأمريكية الشائعة (T-2) إلى 16.500 طن، ليبدأ بعدئذ الارتفاع السريع في حجم حمولة السفن مع اتساع تجارة النفط عالمياً (الشحنات المتجهة إلى أوروبا واليابان) في أواخر خمسينيات القرن الفائت. أما يونيفرس أبولو *Universe Apollo* فكانت أول سفينة حمولتها 100.000 طن عام 1959؛ وفي عام 1966 وصلت حمولة السفينة إندميتسو مارو *Idemitsu Maru* إلى 210.000 طن. وعندما رفعت منظمة أوبك عام 1973 أسعار نفطها بمقدار خمسة أضعاف، كانت أكبر سفينة قادرة على حمل ما يزيد على 300.000 طن (كومار 2004).

كان بناء سفن قادرة على حمل مليون طن من النفط الخام ممكناً من الناحية الفنية، لكنه غير عملي لأسباب كثيرة: فالغاطس يقيد مساراتها، والموانئ التي سترسو بها (فهي غير قادرة على عبور قناة السويس أو قناة بنما)، كما تحتاج إلى مسافات أطول للتوقف، فضلاً عن تكاليف تأمينها الباهظة، ناهيك عن أن تلك السفن العملاقة تتسبب بانسكابات نفطية كارثية كتلك التي أحدثتها أموكو كاديز *Amoco Cadiz* (فرنسا 1978) وكاستيلو دي بلفر *Castillo de Belver* (جنوب أفريقيا 1983)، وإكسون فالديز *Exxon Valdez* (ألاسكا 1989). أما أكبر ناقلة نفط على مستوى العالم سيوايز جاينت *Seawise Giant* فبُنيت عام 1979 بحمولة بلغت 564.763 طناً، وكانت قد أصيبت عام 1988 إبان الحرب الإيرانية-العراقية، إلا أنها عادت مجدداً إلى الخدمة (وهي بطول يقارب 459 م) باسم ياريه فايكينغ *Jahre Viking* أ(1991-2004)، ليتم بعد ذلك تغيير اسمها إلى نوك نيفيز *Knock Nevis* واستخدامها كمخزن عائم ووحدة تفريغ عند شواطئ قطر (2004-2009)، لتباع إلى شركة هندية مختصة في تفكيك السفن، حيث أطلق عليها اسم مونت Mont في آخر رحلة لها إلى ألانج في كوجارات (كونراد Conrad أ2010).

النفط اليوم في كل قارة ومن آبار بحرية في كل محيط باستثناء بحار القطبين الشمالي والجنوبي، ومن حقول يصل عمقها حتى 7 كم تحت سطح الأرض على اليابسة، بينما تقع أحواض النفط البرازيلية «توبي» على عمق 2.1 كم تحت سطح المحيط الأطلسي، ثم على عمق 5 كم تقريباً تحت قاع المحيط. والثالثة أن النفط هو أثمن سلعة تجارية: ففي عام 2014 (وبسعر وسطي بلغ نحو 93 دولاراً أمريكياً للبرميل وفقاً لمؤشر ويست تكساس انترميديت)، بلغت قيمة إنتاجه السنوي قرابة 3 تريليونات دولار أمريكي، وفي عام 2015 (الذي انخفض فيه السعر إلى نحو 49 دولاراً أمريكياً للبرميل) بلغت قيمته 1.6 تريليون دولار (الشركة البريطانية للنفط 2016).

أخيراً، ورغم اتساع مساحة استخراج النفط، إلا أن أكبر حقول النفط التي اكتشفت على اليابسة كانت في منطقة الخليج العربي بين عامي 1927 (في كركوك بالعراق) و1958 (في الأهواز بإيران). ولا يزال الغوار، أكبر حقل للنفط على مستوى العالم في المحافظة الشرقية من المملكة العربية السعودية، ينتج النفط منذ 1951، كما يعمل البرقان، ثاني أكبر حقل في الكويت، منذ 1945 (سميل 2015ب؛ الشكل 5-14). لا شيء يمكنه تغيير هذه الحقيقة الراسخة وهي أنه في عام 2015 كان في المنطقة قرابة نصف احتياطي النفط التقليدي (السائل)، الأمر الذي كان سبباً لصراعات عالمية معقدة وانعدام الاستقرار السياسي المزمن فيها (الشركة البريطانية للنفط 2016).

يسهم الغاز الطبيعي منذ عقود في الإمداد العالمي بالطاقة: ففي عام 1900 لم تزد نسبة تغذيته على 1% من جميع أنواع الطاقة الأحفورية، وفي عام 1950 لم تتعد نسبته 10% أيضاً، لكن بعد ذلك، وفي عام 2000، عملت ثلاثة اتجاهات رئيسة للطلب على رفع نسبته العالمية إلى نحو 25% من إجمالي أنواع الطاقة الأحفورية. وفي القرن العشرين زاد إجمالي الطاقة المشتقة من أنظف أنواع الوقود الأحفوري على الإطلاق بنحو 375 ضعفاً (سميل 2010أ). أما السوق الأصغر نسبياً، رغم أهميتها الكبيرة، فكانت في استخدام الغاز الطبيعي كمادة أولية ووقود لتركيب الأمونيا - السماد الآزوتي بالغ الأهمية، والذي يستخدم اليوم بالدرجة الأولى كمادة أولية لإنتاج اليوريا الصلب (سميل 2001؛ الرابطة الدولية لصناعة الأسمدة 2015) - وكذلك لإنتاج البلاستيك.

تطورت أكبر سوق عالمية جديدة إثر ارتفاع مستويات تلوث الهواء في المناطق الحضرية الذي عاشته جل المدن الغربية في فترة تسارع التحول الصناعي في أعقاب الحرب العالمية الثانية، حيث استبدل الغاز الطبيعي بالفحم وزيت الوقود لمصلحة تدفئة المنشآت الصناعية والمؤسسات والمنازل (وكذلك للطبخ) ما أوقف انبعاث الجسيمات وأوقف بشكل شبه كلي توليد ثاني أكسيد الكبريت SO_2 (إذ ليس من الصعوبة بمكان إزالة مركبات الكبريت عن الغاز قبل احتراقه). واتبعت هذا الاتجاه أيضاً مدن أخرى في بلدان ركبت موجة التحديث السريع في أمريكا اللاتينية وآسيا، مع أن كثيراً من تلك المدن، بما فيها طوكيو وغيرها من المناطق الحضرية اليابانية، وسول وغوانغزو، وشنغهاي ومومباي، كان عليها اتخاذ هذه الخطوة باستخدام غاز طبيعي مسال ومستورد باهظ التكاليف. أما الاتجاه الأخير المعزز لاستخدام الغاز الطبيعي فتمثل في استخدام الوقود على نحو كفء لتوليد الكهرباء عن طريق العنفات الغازية، وكذلك بالطريقة الأكثر كفاءة

التي تستخدم فيها عنفات غازية ذات دورة مركبة (انظر القسم التالي). إن التكسير الهيدروليكي ما بعد عام 2005 لم يوقف تراجع استخراج الغاز الأمريكي بشكل أكبر فحسب، بل أعاد البلد إلى مصاف أكبر منتج للغاز ثانية.

ينطوي نقل الغاز الطبيعي عبر الأنابيب على تكاليف أكبر قياساً بنقل السوائل، ولم يصبح نقله عبر الأنابيب لمسافات طويلة اقتصادياً إلا بعد اعتماد أنابيب فولاذية كبيرة القطر (يصل طول قطرها حتى 2.4 م) وضواغط عنفات غازية عالية الكفاءة (سميل 2015أ). ولدى الولايات المتحدة وكندا نظم متكاملة من أنابيب الغاز منذ ستينيات القرن الماضي، إلا أن الشبكة الدولية الأوسع كانت قد تطورت في أوروبا منذ أواخر ستينيات القرن الماضي. أما أطول خطي غاز - أحدهما بطول 4.451 كم يمتد من أورينجوي Urengoy إلى محطة أوزجورود Uzhgorod على الحدود الأوكرانية السلوفاكية، والآخر بطول 4.190 كم من يمال Yamal إلى ألمانيا - فيوصلان الغاز



الشكل 5-14

آبار حقل البرقان للنفط (على الجانب الأيمن الشرقي للصورة) بعد إشعالها من جانب الجيش العراقي المنسحب عام 1991. التقطت الصورة بتاريخ 7 أبريل/نيسان 1991 من قبل مرصد

الأرض التابع للإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) earthobservatory.nasa.gov

السيبيري إلى وسط أوروبا وغربها، حيث تجتمع هذه الأنابيب مع الإمدادات القادمة من هولندا وبحر الشمال وشمال أفريقيا.

اتسمت أولى شحنات الغاز الطبيعي المسال في ستينيات القرن الفائت بتكاليفها الباهظة، وبقيت التجارة المحدودة في العقود الثلاثة اللاحقة مقتصرة على امداد بلدان شرق آسيا (اليابان وتايوان وكوريا الجنوبية) التي لا مصادر غاز محلية لديها. إلا أن الاكتشافات الجديدة للغاز ودخول ناقلات أكبر للغاز الطبيعي المسال إلى الخدمة أدى إلى اتساع نطاق هذه التجارة على نحو مفاجئ نسبياً، وبحلول عام 2015 نُقل نحو ثلث إجمالي كمية الغاز المصدّر بوساطة الناقلات (الشركة البريطانية للنفط 2016). وتبقى اليابان أكبر مستورد للغاز، لكن عما قريب ستصبح الصين أكبر مشترٍ للغاز على مستوى العالم. لكن إن عكسنا الأدوار، تقوم الولايات المتحدة، التي هي أكبر مستورد للغاز الكندي عبر الأنابيب، بتطوير الكثير من مرافق الغاز الطبيعي المسال، على أمل أن يصبح هذا البلد مُصدّراً رائداً للغاز الطبيعي المسال، كمنافس مستقبلي لقطر، ذلك البلد الصغير والغني الذي يبيع الغاز الطبيعي المسال من أكبر حقل للغاز على مستوى العالم في الخليج العربي (سميل 2015أ).

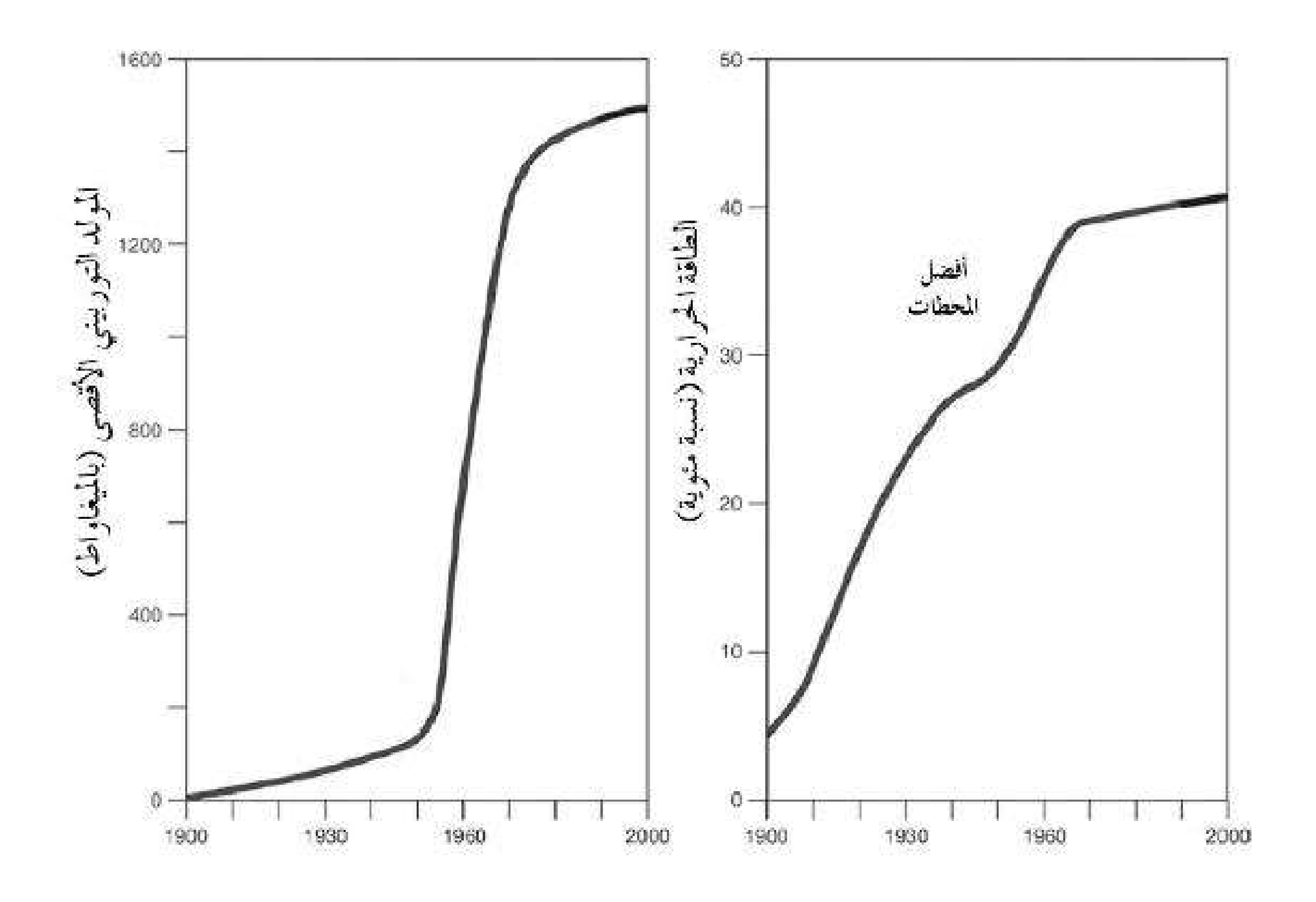
الكهرباء

يتطلب تعزيز الاعتماد على الكهرباء زيادات أسية في معدلات جميع مكونات هذه المنظومة. فالمراجل الأولى الصغيرة نسبياً كانت تلقم بقطع الفحم الذي يحرق على مشابك متحركة. وفي عشرينيات القرن الماضي، بدأ التحول نحو الاستعاضة عنها بوحدات متعددة الطوابق تقوم بحرق الوقود المسحوق والمحقون داخل غرفة احتراق خاصة، وتسخين دارة المياه داخل أنابيب فولاذية تبطن جدران المرجل. كما بات زيت الوقود والغاز الطبيعي خيارين معروفين للوقود المستخدم في محطات الطاقة المركزية الضخمة، إلا أن استخدام زيت الوقود توقف (ما عدا في روسيا والعربية السعودية) عقب رفع منظمة أوبك لأسعار النفط للمرة الثانية في الفترة 1979-1980، بينما يحرق الغاز الطبيعي لتوليد الكهرباء اليوم داخل عنفات غازية بالدرجة الأكبر، لا في البلدان الغنية بالغاز فحسب، بل حتى في البلدان التي يتعين عليها استيراد الغاز الطبيعي المسال باهظ التكاليف. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، سجلت نسبة الكهرباء التي تولد باستخدام الغاز زيادة من 12% بالمجمل عام 1990 إلى 33% عام 2014، بينما كانت نسبة استخدام الغاز الطبيعي المسال في اليابان عام 2010 28%، قبل أن ترتفع إلى 44% عام 2012 عقب إغلاق محطات الطاقة النووية إثر كارثة فوكوشيما (مشروع التحول 2015).

تمد المراجل الضخمة المولدات العنفية بالبخار، حيث تصنف أفضلها بأن قيمتها الأسية أكبر بثلاث مرات ما كانت عليه عام 1900 (أكبر الوحدات في محطة فلامانفيل للطاقة النووية في فرنسا، باستطاعة 1.75 جيغا واط)، كما أدت الزيادة في مستويات الضغط ودرجات الحرارة اللازمة لتشغيلها إلى رفع نسبة الكفاءات الفضلى من أقل من 10% عام 1900 إلى ما يزيد على 40% (الشكل 5-15). كما يمكن الحصول على كفاءات أعلى، بنسبة أسية قدرها 60%، باستخدام مجموعة من عنفات غازية (تزيد استطاعة العنفات الكبرى المتوافرة اليوم على 400 ميغا واط) وعنفات بخارية (باستخدام الغاز الحار الخارج من العنفة الغازية لإنتاج البخار). فلا عجب إذن إن بات استخدام العنفات الغازية ذات الدورة المركبة الطريقة المفضلة لتوليد الكهرباء، لاسيما لتغطية الحاجة إليها عند فترات ذروة الطلب في مواقع نائية، فضلاً عن توفير استطاعات بديلة على أهبة الاستعداد لمواصلة الإمداد بالطاقة في فترات الطوارئ.

بدأ التوسع في المرافق الخدمية من النظم الحضرية إلى المستوى الوطني ككل بعد الحرب العالمية الأولى، ليتسارع بعد الحرب العالمية الثانية حيث اشتمل على المكونات العالمية التالية (هيوز 1983): متابعة اقتصادات النطاق[30]؛ بناء محطات أكبر داخل المدن الكبيرة أو على مشارفها؛ تطوير وصلات عالية الجهد لنقل الكهرباء من المحطات المائية النائية؛ تشجيع الاستهلاك العام، وربط النظم الأصغر لتحسين أمن الإمداد وتخفيض الاستطاعات المركبة والاحتياطية. وبعد عام 1950، أدت المخاوف حيال تلوث الهواء إلى وضع محطات توليد الكهرباء الجديدة والضخمة على مقربة من مصادر النفط. وهذا التحول باتجاه إنشاء محطات عند باب المنجم زاد الحاجة إلى نقل الكهرباء عالية الجهد.

وعليه، ازدادت طاقة أكبر المحولات بمقدار 500 ضعف، كما ارتفع أعلى جهد لنقل الكهرباء بأكثر من 100 ضعف منذ تسعينيات القرن التاسع عشر. لقد بدأ نقل الكهرباء باستخدام أعمدة خشبية وأسلاك نحاسية متينة، حتى أصبحت في النهاية أبراجاً فولاذية تحمل كابلات ألمنيوم مسلحة بالفولاذ ومشحونة بجهد 765 كيلو فولط، حيث يبلغ أعلى جهد للتيار المباشر اليوم ± 800 كيلو فولط باستطاعة



الشكل 5-15

الاستطاعات القصوى لمولدات العنفات البخارية وكفاءات أفضل محطات الطاقة الحرارية في الفترة 1900-2000. المخطط من بيانات دالبي Dalby أ(1920)، تيرمولين Termuehlen أ(2001) وسميل (2008أ).

6.4 جيغا واط بين محطة زيانغجيابا the Xiangjiaba للطاقة المائية وشنغهاي. أما خدمات المنازل فازدادت من مآخذ معدودة إلى نظم تشتمل عادة على أكثر من 50 قاطعة ومأخذاً في المسكن الواحد. وترافق الارتفاع في قيمة الاستطاعة والزيادة في توليد الكهرباء مع زيادة ثبات الخدمة، وهو جانب يحمل أهمية خاصة في عالم تغزوه الأجهزة الإلكترونية والتحكم الإلكتروني (مربع 5-14).

تسارع اعتماد الانشطار النووي مع اندلاع الحرب العالمية الثانية طريقةً رئيسةً أخرى لإنتاج البخار في عملية توليد الكهرباء بالطاقة الحرارية. فالعرض الأول لهذه الظاهرة، الذي قدمته ليز

مايتنر Lise Meitner وأوتو فريش Otto Frisch في ديسمبر/كانون الأول 1938 أعقبه أول تفاعل تسلسلي مستمر أجري في جامعة شيكاغو في الثاني من ديسمبر/كانون الأول 1942. وبعد اختبار أول قنبلة نووية في يوليو/تموز 1945، ألقيت قنبلتان نوويتان بفارق ثلاثة أيام بينهما في أغسطس/آب 1945 (كيساريس Kesaris أ1977؛ أتكينز Atkins أ2000). وبعيداً عن التطوير المتواصل لأسلحة نووية أشد فتكاً (انظر القسم الخاص بالأسلحة والحرب في الفصل التالي)، تمثل أول برنامج نووي أمريكي رئيس بعد الحرب في تطوير مفاعلات نووية تستخدم في محركات الغواصات، حيث أطلقت الغواصة *Nautilus* في يناير/كانون الثاني 1955، لتوكل مباشرة إلى هايمان ريكوفر Hyman Rickover أ(1900-1986)، رئيس برنامج الغواصة النووية، مسؤولية إعادة تشكيل المفاعل لمصلحة توليد الكهرباء التجارية (بولمار Polmar وألين Allen أ1982). وبدأ تشغيل أول محطة أمريكية للطاقة النووية التي حملت اسم شيبينغ بورت Shippingport في بنسلفانيا، في ديسمبر/كانون الأول 1957، بعد أكثر من سنة على إطلاق موقع كالدر هول Calder Hall البريطاني في أكتوبر/تشرين الأول 1956.

وبنظرة إلى الوراء نتبين أن هذا لم يكن الخيار الأفضل في تصميم المفاعل، إلا أنه بات الأنموذج السائد عالمياً. صحيح أنه ليس بالتصميم الخارق، إلا أن اعتماده المبكر جعل منه تصميماً راسخاً حين ظهرت مفاعلات أخرى ودخلت ميدان المنافسة (كاون Cowan أ1990). وفي منتصف عام 2015، كان 277 مفاعلاً نووياً من أصل 437 على مستوى العالم، معظمها في الولايات المتحدة وفرنسا، تعتمد على المياه المضغوطة. ولو ألقينا نظرة على نصف قرن مضى من توليد الطاقة النووية لأغراض تجارية، لوجدتني أصف الكهرباء النووية بالإخفاق الناجح (سميل 2003)، حيث جاءت التطورات اللاحقة لتدعم حكمي هذا. فهي تستمد نجاحها من أنها أمدت العالم بنسبة 10.7% من الكهرباء في عام 2015، وقبل موجة إنشاء محطات طاقة تعمل بالفحم التي شهدتها الصين مؤخراً كانت نسبة الكهرباء النووية نحو 17%. ونجد نسباً كثيرة أعلى من هذه المذكورة على المستوى الوطني، منها 20% في الولايات

مربع 5-14

اعتمادية التغذية الكهربائية

يُعبر عن اعتمادية التغذية الكهربائية في الغالب بمصطلح التسعات، وهي النسبة المئوية الزمنية في سنة مؤلفة من 365 يوماً تؤدي فيها شبكة معينة عملاً مناسباً وتكون قادرة على الإمداد بالطاقة لتلبية الطلب. فالنظام المؤلف من أربع تسعات، مع توافر للكهرباء بنسبة 99.99% من الوقت، يعد على درجة كبيرة من الاعتمادية، إلا أن إجمالي الانقطاعات السنوية فيه يصل إلى نحو 54 دقيقة. أما النظام المؤلف من خمس تسعات فيتجاوز فيه إجمالي انقطاع التيار 5 دقائق بقليل. فالأداء الأمريكي الراهن يبلغ نحو 99.98%، حيث تحدث الانقطاعات نتيجة عوامل لا تقتصر على الطقس فحسب (كالزوابع والأعاصير والعواصف الثلجية والبرد الشديد)، بل بفعل

أعمال التخريب وانقطاع الإمداد بالوقود (ويرفس بروك Wirfs-Brock أ2014؛ هيئة ثبات التغذية الكهربائية في أمريكا الشمالية 2015).

يعد التواصل والتحكم والتخزين الإلكتروني للمعلومات أساس كل قطاع من قطاعات الاقتصاد الحديث، حيث يتراوح بين إرسال شحنات الأغذية بوساطة الشاحنات ومراقبتها، والإنتاج الآلي للرقاقات المجهرية، ومن التعامل بالأوراق المالية إلى مراقبة حركة المرور الجوية، أما السبيل الوحيد لضمان توافر خدمة مستمرة من دون انقطاع فيكمن في تركيب أنظمة الطوارئ (بطاريات ومولدات) القادرة على الاستجابة السريعة. إذ حتى انقطاع التغذية الكهربائية لفترة قصيرة قد يفضي إلى تكبد تكاليف باهظة جداً، حيث تصل تكاليفه إلى أكثر من 10 ملايين دولار أمريكي في الساعة بالنسبة لبعض الخدمات والأنشطة الصناعية، ففي الفترة ما بين 2003 و2011 تراوحت تكلفة انقطاع الكهرباء على المستوى الوطني في الولايات المتحدة بين 18 و75 مليار دولار أمريكي (الانقطاع نجم عن إعصار أيك عام 2008) (المكتب التنفيذي الرئاسي 2013). أما شبكة الكهرباء فهي المرشح الأول للهجمات الإلكترونية من قبل الجماعات الإرهابية أو من جانب معارضي الحكومات.

المتحدة، و30% في كوريا الجنوبية (وكذلك في اليابان قبل عام 2011)، و77% في فرنسا. أما إخفاقها فيأتي من عدم قدرتها على الإيفاء بكثير من وعودها الهائلة في بداياتها (ففي سبعينيات القرن الماضي ساد توقع على نطاق واسع بأن الطاقة النووية ستكون الأنموذج السائد لتوليد الكهرباء على مستوى العالم مع نهاية القرن).

إن ضعف التصاميم السائدة من الناحية الفنية، وارتفاع تكاليف إنشاء المحطات النووية وتأخير استكمالها على نحو ملازم لها، والمشكلة التي لم تجد حلاً المتمثلة في التخلص من المخلفات المشعة على المدى البعيد، فضلاً عن انتشار المخاوف حيال سلامة التشغيل (بما في ذلك بعض الادعاءات المبالغ بها بإمكانية تأثيرها في الصحة، حتى بعد مرور 60 عاماً عن التجربة التجارية معها) سرعان ما كبح تطور الصناعة النووية. فالمخاوف المرتبطة بالسلامة وإدراك العامة للمخاطر التي لا سبيل لتحملها عززها حادث جزيرة الأميال الثلاثة عام 1979، وكذلك كارثة تشيرنوبل عام 1986 وانفجار ثلاثة مفاعلات في فوكوشيما داي إيتشي Fukushima Dai-ichi بفعل زلزال عنيف وموجة تسونامي (إليوت 2013).

نتيجة لذلك، رفضت بعض البلدان إنشاء أي محطة نووية على أراضيها (كالنمسا وإيطاليا)، بينما أعدت دول أخرى خططاً لإغلاق محطاتها بشكل كامل في المستقبل المنظور (كألمانيا والسويد)، كما توقف بعض الدول التي لا تزال المنشآت النووية فيها قيد الخدمة عن إضافة استطاعات جديدة لمنشآتها منذ عقود (مثل كندا والمملكة المتحدة) أو اقتصرت على بناء محطات جديدة أقل بكثير من المطلوب لتحل محل القديمة منها. وتعد الولايات المتحدة واليابان الأبرز ضمن الفئة الأخيرة: ففي منتصف 2015 كان ثمة 435 مفاعلاً عاملاً حول العالم، و67 مفاعلاً قيد الإنشاء، منها 25 في

الصين وتسعة في روسيا وستة في الهند (الرابطة العالمية للطاقة النووية 2015ب). لقد أدار الغرب ظهره لهذه الطريقة النظيفة الخالية من الكربون لتوليد الكهرباء.

الطاقات المتجددة

تسبب تنامي الاعتماد على الوقود الأحفوري في أفول نجم الوقود الحيوي نسبياً، لكن نظراً للنمو السريع في عدد سكان المناطق الحضرية داخل البلدان متدنية الدخل (التي لا سبيل فيها للوصول إلى أنواع الطاقة الجديدة أو يكون الوصول إليها محدوداً جداً)، بات العالم اليوم يستهلك من الحطب والفحم النباتي أكثر من ذي قبل. وتبعاً لأفضل تقديراتي، وصل إجمالي الطاقة المستمدة من الوقود الحيوي التقليدي إلى نحو 45 إكسا جول عام 2000، وهي تعادل تقريباً ضعفي الطاقة عام 1900 (سميل 2010أ)، وفي السنوات الخمسة عشر الأولى من القرن الحادي والعشرين شهد إجمالي الرقم تراجعاً طفيفاً. ما يعني أن الوقود الحيوي في عام 2000 أمد العالم بنحو 12% من الطاقة الأساسية، لتتراجع هذه النسبة عام 2015 إلى نحو 8% (بعد أن كانت نسبة الطاقة التي غذى بها 50% عام 1900).

ولسوء الحظ، فإنه حتى هذا الإنتاج الذي يعادل نحو 1 جيغا طن من النفط لم يكن كافياً، حيث لايزال مئات الملايين من سكان المناطق الريفية في البلدان متدنية الدخل في أفريقيا وآسيا وأمريكا اللاتينية يشعلون وقود الكتلة الحيوية، وكان الطلب على الحطب والفحم النباتي السبب الرئيس وراء قطع الغابات، وهي الظاهرة الأبرز في منطقة الساحل الأفريقي ونيبال والهند والمناطق الداخلية من الصين وكثير من بلدان أمريكا الوسطى. أما السبيل الأنجع لخفض حالة التدهور هذه فيكمن في إدخال مواقد جديدة عالية الكفاءة (25-30% قياساً بأنواع المواقد التقليدية التي تتراوح نسبة كفاءتها بين 10-15%)، حيث كانت عملية استبدال المواقد هي الأنجع في الصين، حيث وصلت المواقد عالية الكفاءة إلى نحو 75% من الأسر الريفية قبل نهاية القرن (سميل 2013).

وفي الوقت عينه، من الخطأ التفكير بالخشب من زاوية الغابات فقط، نظراً لأن أفراد الأسر (وبخاصة النساء والأطفال في معظم الأحيان) يقومون بجمع نسبة كبيرة من مادة الخشب في كثير من البلدان الفقيرة من البساتين والأحراش الصغيرة، ومن مزارع الأشجار (مثل المطاط وجوز الهند) وكذلك من الأشجار على جانبي الطريق والحدائق الخلفية. وقد أظهرت المسوحات التي أجريت في بنغلاديش وباكستان وسري لانكا أن هذا الخشب الذي يعود إلى مصدر غير الغابات يشكل أكثر من 80% من كامل كمية الخشب التي تحرق (البرنامج الإقليمي لتنمية الطاقة المستمدة من الخشب 1997). وحتى وقتنا الراهن لا يزال يحرق خمس كامل مخلفات المحاصيل المنتجة في البلدان الفقيرة، كما لايزال لروث الحيوانات المجفف أهمية كبيرة في بقاع من آسيا، إلا أن الفحم النباتي بات الوقود الحيوي المفضل. وبحسب التوقعات، تعد الصين والهند المستهلك الأكبر للوقود الحيوي التقليدي على مستوى العالم، تليهما البرازيل وإندونيسيا، لكن على المستوى النسبي نجد أن هذا لا ينطبق على إقليم الصحراء الأفريقية، فمع نهاية القرن العشرين كانت بعض البلدان تستمد أكثر من 80% من طاقتها في المناطق الريفية من الخشب ومخلفات المحاصيل، مقارنة مع

25% في البرازيل ودون 10% في الصين (سميل 2013أ). أما استخدام الخشب ومخلفات المحاصيل على مستوى الفرد فتراوح من 5 جيغا جول حتى 25 جيغا جول/سنة.

شهدت عقود القرن العشرين الأخيرة إنتاج الإيثانول على نطاق واسع إلى حدّ ما. وتعود التجارب التي أجريت على الإيثانول المستخدم في سيارات الركاب إلى ما قبل الحرب العالمية الثانية (هنري فورد كان من بين مقترحيه)، إلا أن إنتاج الإيثانول على نطاق واسع في العصر الحديث بدأ عام 1975 مع برنامج ProÁlcool البرازيلي لتخمير الوقود المشتق من قصب السكر (ماسيدو Macedo، ليل Leal ودا سيلفا da Silva أ2004؛ باسو Basso، باسو Basso، وروتشا Rocha أ2011)، بينما بدأ إنتاج الإيثانول اعتماداً على الذُرة في أمريكا عام 1980 (سلمون Solomon وبارنز Barnes وهالفورسن Halvorsen أ2007). منذ 2008 والإنتاج البرازيلي يشهد حالة من الركود، كما أنه من المستبعد أن يسجل الإنتاج الأمريكي، الذي اضطلع الكونجرس الأمريكي بمسؤولية زيادته، أي ارتفاع يذكر. وهنالك أيضاً صناعة ديزل حيوي على نطاق أصغر، حيث تتم صناعة وقود سائل من الكتلة الحيوية النباتية الغنية بالزيت كفول الصويا وبذور اللفت وثمار نخيل الزيت (وزارة التعليم الأمريكية 2011). ووصل الإنتاج العالمي من الوقود الحيوي السائل إلى قرابة 75 ميغا طن من مكافئ الزيت عام 2015، ما يشكل نحو 1.8% من الطاقة المستخرجة سنوياً من النفط الخام (الشركة البريطانية للنفط 2016). وتوسيع نطاق هذه الصناعة للإمداد بالوقود الحيوي السائل بنسبة بارزة على مستوى العالم يبقى أضغاث أحلام (جيامبيترو Giampietro ومايومي Mayumi أ2009؛ سميل 2010أ).

يشكل استخدام الطاقتين الكامنة والحركية للمياه لتوليد الكهرباء، بعد الوقود الحيوي التقليدي والحديث، ثاني أهم مصادر الطاقة المتجددة على مستوى العالم. فقد بدأ توليد الكهرباء من الطاقة الكهرمائية عام 1882، بالتزامن مع توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية، عندما غذت إحدى النواعير الصغيرة التي نصبت على نهر فوكس في آبلتون، ويسكنسن، مولدين لإنتاج 25 كيلو واط لإنارة 280 مصباحاً ضعيفاً (داير ومارتن 1929). وقبل نهاية القرن بدأ بناء سدود أعلى في بلدان جبال الألب واسكندنافيا وكذلك في الولايات المتحدة. إلا أن أول محطة لتوليد التيار المتناوب بنيت عند نياجارا عام 1895 اتسمت بصغرها (37 ميغا واط) قياساً بمشاريع بنيت في ثلاثينيات القرن الماضي بدعم حكومي في الولايات المتحدة (سلطة وادي تينيسي التي ظهرت إلى النور بموجب «الصفقة الجديدة»، والمكتب الأمريكي لاستصلاح الأراضي) وكذلك في الاتحاد السوفيتي كجزء من التحول الصناعي الستاليني في ثلاثينيات القرن العشرين (ألين 2003). أما أكبر المشاريع الأمريكية في ذلك العهد فكان سد هوفر على نهر كولورادو (1936؛ 2.08 جيغا واط) وسد غراند كولي على نهر كولومبيا، حيث استكملت مرحلته الأولى عام 1941 (لتصل استطاعته أخيراً إلى 6.8 جيغا واط).

جعلت العقود الثلاثة التالية على عام 1945 من الطاقة المائية مصدر نحو 20% من الكهرباء على مستوى العالم، حيث استكملت أكبر المشاريع في كل من البرازيل وكندا والاتحاد السوفيتي وكذلك في الكونجو ومصر والهند والصين. إلا أن أعمال إنشاء مشاريع جديدة شهدت تباطؤاً أو توقفت كلياً في جل البلدان منذ ثمانينيات القرن الماضي، باستثناء الصين، حيث استكمل فيها بناء

أكبر سد في العالم عرف باسم سانزيا أو «سد الممرات الثلاثة» (باستطاعةٍ مركبةٍ تبلغ 22.5 جيغا واط في 34 وحدة) عام 2012 (تشينكولد Chincold أ2015). وفي عام 2015 زودت العنفات المائية نحو 16% من الكهرباء في العالم، حيث وصلت نسبتها إلى 60% في كندا، وإلى نحو 80% في البرازيل، مع نسب أعلى في عدد من البلدان الأفريقية الصغيرة.

تمثل التحولان اللذان حظيا باهتمام بالغ على مستوى الطاقة المتجددة في الكهرباء الناتجة عن طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وهذا الاهتمام يعود إلى انتشارهما السريع - فبين عامي 2010 و2015 سجل توليد الكهرباء اعتماداً على طاقة الرياح زيادة على المستوى العالمي بنحو 2.5 ضعف، بينما ازداد توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية بنحو ثمانية أضعاف - وكذلك إلى التوقعات المبالغ بها لحجم اعتمادهما مستقبلاً. ويعد هذا الانتشار السريع صفة شائعة تتسم بها مراحل التطور المبكرة، بينما يبقى إسهام هذين المصدرين في توليد الكهرباء مهملاً على النطاق العالمي (ففي عام 2015 ولدت الرياح نحو 3.5%، بينما أنتج الإشعاع الشمسي المباشر 1% من كهرباء العالم). وينطوي دمج تدفقات أعلى من مصدري الطاقة المتقطعين مع الشبكات الراهنة على الكثير من التحديات (فكثير من عنفات الرياح تعمل بنسبة 20-25% من الوقت، بينما تعمل بعض المزارع البحرية بنسبة 40%) (ج. ب. مورجان J.P. Morgan أ2015).

أطلقت عملية التطوير الحديثة لطاقة الرياح من قبل قروض الضرائب الأمريكية في مطلع ثمانينيات القرن الماضي، وانتهت بشكل مفاجئ مع انتهاء مدتها عام 1985 (براون وسميث 1992). لتصبح أوروبا رائداً جديداً في تسعينيات القرن الماضي، إذ تبنت عديد من الحكومات، كالدنمارك والمملكة المتحدة وإسبانيا وبالأخص ألمانيا سياسات وضعت لتسريع التحول إلى الكهرباء الناتجة عن الطاقة المتجددة، كجزء من برنامجها لتسخير طاقة الرياح *Energiewende*. انخفضت التكاليف، وعززت المكنات ذات الاستطاعة الأكبر (التي تصل اليوم حتى 8 ميغا واط، وعادة بين 1-3 ميغا واط) إلى جانب المزارع الأكبر مساحة لعنفات الرياح (بما في ذلك المزارع البحرية) النمو الذي حدث مؤخراً من أقل من 2 جيغا واط استطاعة مركبة عام 1900 إلى 17.3 جيغا واط عام 2000 و432 جيغا واط مع نهاية عام 2015 (المجلس العالمي لطاقة الرياح 2015).

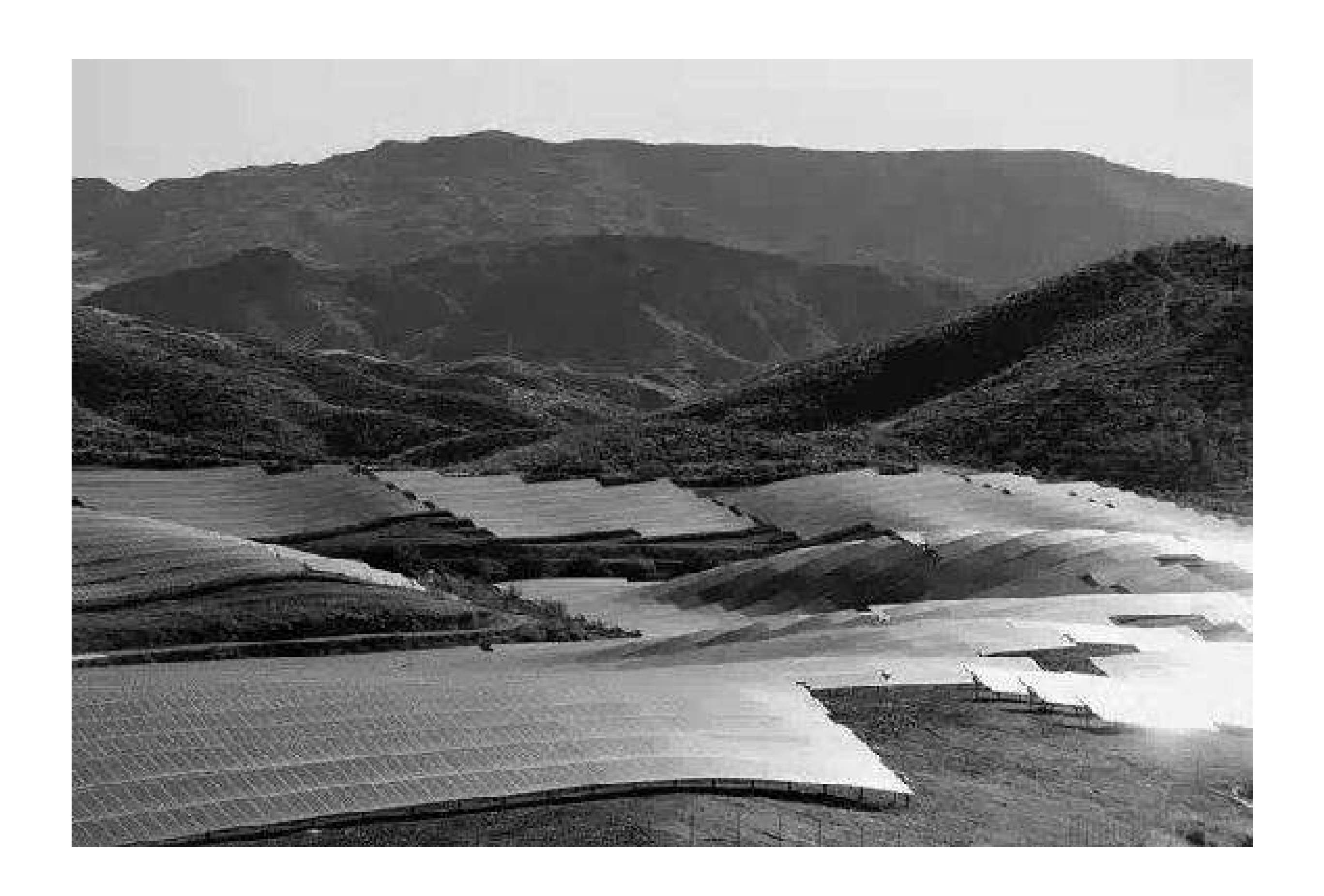
يعود الفضل في اكتشاف تأثير الخلايا الكهرضوئية (الكهرباء التي يتم توليدها باستخدام أقطاب معدنية معرضة للضوء) في عام 1839 إلى إدموند بيكيريل (1852-1908)، لكن في عام 1954، أنتجت مختبرات بيل خلايا شمسية من السيليكون اتسمت بعلو تكلفتها وتدني كفاءتها (حيث أعطت في البداية نسبة 4.5% ولاحقاً 6%) وقد استخدمت لأول مرة عام 1958 لتغذية القمر الاصطناعي «فانغارد 1» (باستطاعة 0.1 واط فقط)؛ وبعد أربع سنوات، وتحديداً عام 1962، غذي القمر الاصطناعي التجاري الأول للاتصالات «تلستار 1» بخلايا كهرضوئية باستطاعة 14 واط، بينما حمل القمر الاصطناعي «نيمبوس» خلايا تولد استطاعة قدرها 470 واط (سميل 2006)، فالتطبيقات الفضائية - حيث لا تأتي التكلفة في طليعة الاهتمامات - تواصل جهودها منذ عقود، إلا أن استخدام تلك الخلايا على الأرض لتوليد الكهرباء بقي محدوداً لارتفاع تكاليفه، ولم تبدأ هذه الصناعة بالنمو إلا في أواخر تسعينيات القرن الماضي. وعلى صعيد الطاقة

القصوى (المتوافرة حتى مع الإشعاع الشمسي لبضع ساعات في النهار)، تم نقل 50 ميغا واط فقط من الخلايا الكهرضوئية عام 1990، و17 جيغا واط عام 2010، ونحو 50 جيغا واط عام 2015، عندما وصلت الاستطاعة التراكمية إلى 227 جيغا واط (جايمس 2015؛ شبكة REN21، 2016).

إلا أن توليد الكهرباء من الخلايا الكهرضوئية اتسم بعوامل استطاعة أدنى قياساً بتوليدها من الرياح (حيث تتراوح نسبتها في المناخات الغائمة لفترات أطول بين 11-15%، وحتى في أريزونا نحو 25%)، وفي عام 2015 اقتصر توليد الكهرباء عالمياً من عنفات الرياح على قرابة 30% فقط من إجمالي توليد الكهرباء (الشكل 5-16). مرة أخرى، لم يكن نمو هذه الصناعة عملية تدريجية وعضوية، بل ترويجاً قادته أوجه الدعم الحكومي: ولا شيء يوضح هذه النقطة أفضل من إنتاج ألمانيا ذات المناخ الغائم في عام 2015 كمية من الكهرباء من الخلايا الكهرضوئية تعادل ثلاثة أضعاف نظيرتها التي أنتجتها إسبانيا المشمسة (الشركة البريطانية للنفط، 2016). أما تسخين المياه باستخدام سخانات صغيرة فوق أسطح المنازل وكذلك باستخدام مجموعات صناعية أكبر كان قد سبق انتشار توليد الكهرباء بالخلايا الكهرضوئية. ومع نهاية عام 2012 بلغت الاستطاعة المركبة للسخانات نحو 270 جيغا واط، معظمها في الصين وأوروبا (ماوثنر ووايس 2014). أما الطاقة الشمسية المركزة، التي تستخدم فيها المرايا لتركيز الإشعاع الشمسي من أجل تسخين الماء (أو الملح) لتوليد الكهرباء تعد بديلاً مفيداً لتوليد الكهرباء بالخلايا الكهرضوئية، لكن لم يركب منها سوى القليل (باستطاعة كلية أقل من 5 جيغا واط) عام 2015.

وقياساً بالمصادر الأربعة الرئيسة لتوليد الكهرباء من الوقود الحيوي والطاقة الكهرمائية والرياح والخلايا الكهرضوئية، تبقى عمليات تحويل الطاقة المتجددة الأخرى مهملة على النطاق العالمي، رغم أهمية بعضها على المستوى الوطني أو الإقليمي، كالطاقة الحرارية الجوفية. إذ تستخدم الينابيع والآبار الحارة منذ عصور ما قبل التاريخ، كما تمد الآبار الأكثر عمقاً بالمياه الحارة للتدفئة والأعمال الصناعية في كثير من البلدان. إلا أن المناطق التي يمكن استخراج هذه الطاقة منها كبخار حار طبيعي واستخدامها في توليد الكهرباء تبقى أقل شيوعاً. وقد بدأت أول محطة حرارية أرضية بالعمل في حقل لارديريللو في إيطاليا عام 1092؛ وفي نيوزيلندا عام 1958؛ وكذلك الينابيع الحارة في كاليفورنيا عام 1960. وبحلول عام 2014 بلغت الاستطاعة المركبة العالمية 12 جيغا واط. وكانت حصة الولايات المتحدة من الاستطاعة المركبة هي الأكبر، بينما بقيت أيسلندا الأكثر اعتماداً على هذه الطاقة المتجددة (رابطة الطاقة الحرارية الجوفية 2014).

لم ينفذ أي من الخطط الطويلة الأجل لمحطات الطاقة المعتمدة على المد البحري،



الشكل 16-5

محطة Lucaneina de las Torres للطاقة بالخلايا الكهرضوئية في الأندلس بإسبانيا (Corbis).

باستثناء بعض المنشآت في فرنسا والصين. وإن الاعتماد على مزارع جديدة لأشجار سريعة النمو (كالصفصاف أو الحور أو الكينا أو اللوسينا أو الصنوبر) لقطعها بهدف الحصول على الخشب المستخدم في توليد الكهرباء يعد خياراً تكتنفه كثير من المشكلات البيئية، كما تستخدم مخلفات المحاصيل وغيرها من المخلفات العضوية لإنتاج الغاز الحيوي على نطاق واسع (وهذا ما يشاهد في ألمانيا والصين بشكل رئيس)، إلا أن الفرق الذي تسهم به يبقى محصوراً بالنطاق المحلي. ورغم الكثير من الخيارات المتجددة، وبعض التطورات السريعة، والكثير من الادعاءات المتناقضة، يبقى الحكم الرئيس واضحاً: يستلزم تجنب استخدام الوقود الأحفوري وقتاً طويلاً، شأنه شأن جميع أشكال التحولات في استخدام الطاقة، وعلينا التريث لنرى كيفية تطور عمليات التحول المختلفة لاعتماد أدوار أساسية في عالم جديد للطاقة.

في ضوء أهمية نقل الإنسان والبضائع التي تفرضها الحضارة الحديثة، نجد أن القسم الأخير من الدراسة الاستطلاعية للتطورات الفنية المحددة للأسس الراهنة للطاقة لدى المجتمعات الحديثة يتناول وسائط التحريك الأولية المستخدمة في النقل، حيث يتراوح مجالها من محركات صغيرة متواضعة إلى صواريخ جبارة. إلا أن تطور محركات دورة أوتو (التي تعمل اليوم بالبنزين، مع بعض استخدامات الإيثانول والغاز الطبيعي) كان متحفظاً نوعاً ما منذ العقد الأول للقرن العشرين، وذلك مع دخولها في الإنتاج بكميات كبيرة. أما التغيرات الأهم التي طرأت على تلك المحركات فشملت زيادة نسب الضغط بمقدار الضعفين تقريباً وانخفاض وزنها وزيادة استطاعتها، ما أدى إلى انخفاض نسبة الكتلة إلى الاستطاعة: حيث انخفضت من نحو 40 غ/واط عام 1900 إلى قرابة 1 غ/واط بعد قرن من الزمن. وكان لأول سيارة أمريكية أنتجت بكميات كبيرة، من طراز العارضة المنحنية لرانسوم أولد، محرك وحيد الأسطوانة باستطاعة 5.2 كيلو واط (7 أحصنة بخارية). أما سيارة فورد من طراز T، والذي توقف إنتاجها عام 1927 بعد فترة 19 عاماً أنتجت خلالها 16 مليون وحدة، فكانت ذات محرك أقوى بثلاثة أضعاف.

شهدت السيارات الأمريكية توقفاً في زيادة معدل قوة محركاتها بعد رفع أسعار النفط من قبل أوبك في سبعينيات القرن الماضي، لتستأنف ثانية في ثمانينيات القرن عينه: فقد ارتفع متوسط استطاعة السيارة من نحو 90 كيلو واط عام 1900 إلى نحو 175 كيلو واط عام 2015 (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة 2015). إلا أن كلمة «سيارة» تعد مصطلحاً خاطئاً في واقع الأمر نظراً لأن نحو 50% من جميع المركبات الخفيفة في الولايات المتحدة المستخدمة للنقل الشخصي كانت شاحنات مغلقة وشاحنات خفيفة (بيك أب) وسيارات الدفع الرباعي المعروفة بـ SUV أي مركبات الخدمة الرياضية (وهي أكثر التسميات المغلوطة، إذ أين تكمن الرياضة في تلك السيارات وما هي الخدمة التي توافرها قيادة مثل هذه الشاحنات الصغيرة ذات الوزن الثقيل إلى أحد مراكز التسوق؟). كذلك الأمر بالنسبة لمحركات الديزل، إذ باتت أخف وأقوى، حيث أدت هذه التطورات إلى انتشارها في عديد من أسواق النقل الرئيسة (سميل 2010ب). وظهرت أولى شاحنات محرك الديزل في ألمانيا عام 1924، أما أولى سيارات الركاب الثقيلة المستخدمة لهذا المحرك (أيضاً في ألمانيا) فظهرت عام 1936. وقبل فترة وجيزة من اندلاع الحرب العالمية الثانية كان لجلّ الشاحنات والحافلات الأوروبية الجديدة محركات ديزل، ليصبح هذا العرف السائد بعد الحرب في جميع أنحاء العالم. ولمحركات الحافلات التي تعمل بالديزل استطاعة مرتفعة تصل إلى 350 كيلو واط، مع نسبة كتلة إلى الاستطاعة بين 3-9 غ/واط، حيث بوسعها العمل حتى 600.000 كم من دون أن تستلزم إخضاعها لعملية إصلاح كبيرة.

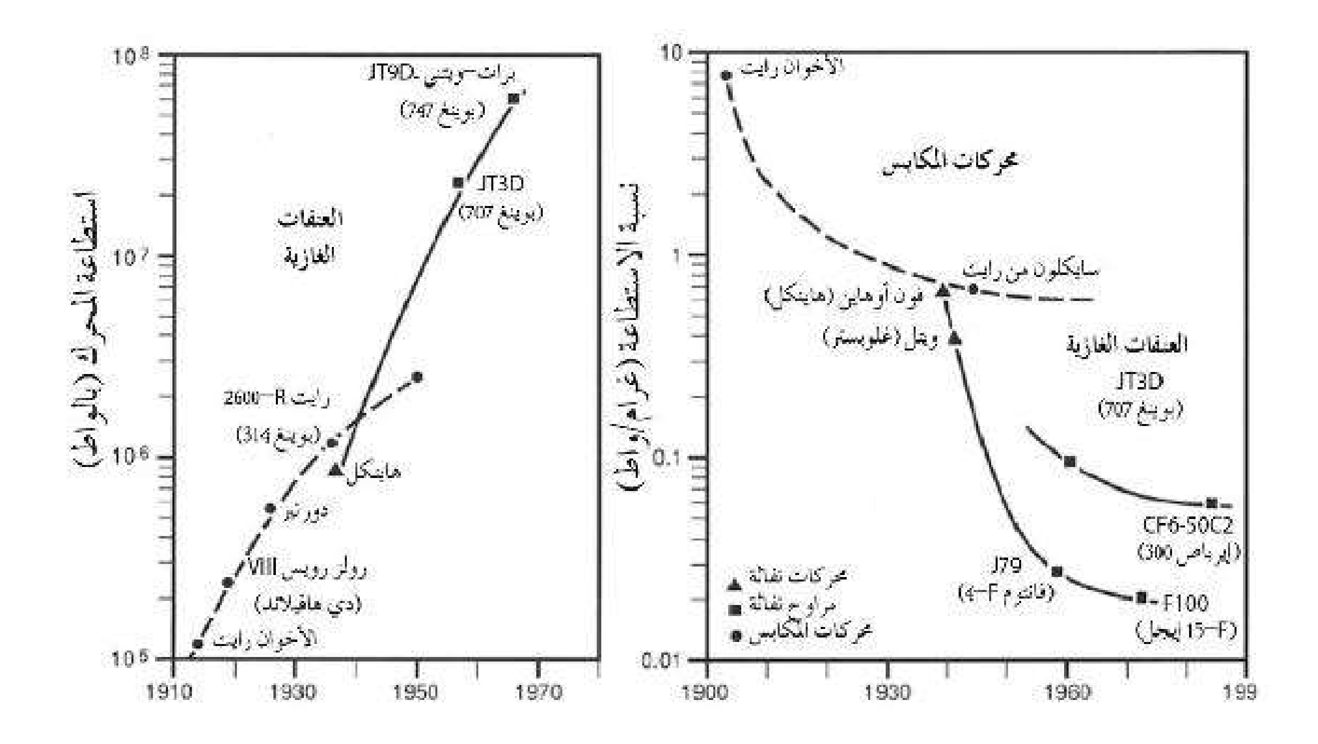
وانخفضت نسب الكتلة إلى الاستطاعة أخيراً في محركات الديزل الخاصة بالسيارات لتصل حتى 2 غ/واط، ما يعني أن المحركات في سيارات الركاب أثقل بشكل طفيف من نظيرتها التي تعمل بالبنزين (سميل 2010ب). ولعل السبب في انتشار سيارات الديزل داخل الاتحاد الأوروبي هو انخفاض تكاليف الوقود، حيث باتت هذه السيارات تشكل اليوم أكثر من 50% من السيارات المسجلة حديثاً (المجلس الدولي المعني بوسائط النقل النظيفة 2014). إلا أن هذه السيارات لا

تزال نادرة في الولايات المتحدة: ففي عام 2014 بلغت نسبتها أقل من 3% من إجمالي المركبات. وعانت صورة طرازات السيارات بشكل كبير منذ خريف 2015، عندما أجبرت فولكسفاغن على الاعتراف بأن الكثير من طرز الديزل المباعة منذ 2008 احتوت على برمجية غير قانونية أنتجت قراءات مزيفة في المحركات المختبرة من حيث الانبعاثات الناتجة عنها كي تتمكن من اجتياز اللوائح البيئية الأمريكية المتعلقة بأكسيد النيتروجين.

تجر قاطرات الديزل (باستطاعة 3.5 ميغا واط) (وتدفع) قطارات الشحن على السكك الحديدية غير الكهربائية كافة حول العالم. وتبعاً لما أشرنا إليه آنفاً، بدأت محركات الديزل بغزو الشحن البحري حتى قبل الحرب العالمية الأولى، حيث باتت وسائط تحريك أساسية لا يمكن الاستغناء عنها لتحقيق العولمة نظراً لأن أنواع التجارة كافة المنقولة بحراً -ومنها مصادر الطاقة والمواد الأولية والمخلفات القابلة للتدوير والأغذية والأعلاف والمنتجات المصنعة- تعتمد على طاقة هذه المحركات الضخمة عالية الكفاءة (سميل 2010ب). أما استطاعة أقوى محركات الديزل البحرية المستخدمة في ناقلات النفط العملاقة وحاملات البضائع الضخمة التي صممها MAN وWärtsilä في أوروبا وصنعت في كوريا الجنوبية واليابان فتصل حتى 100 ميغا واط.

شهدت محركات الطائرات الترددية تطوراً سريعاً جداً. إذ باتت المحركات التي توافر الطاقة لطائرة كليبر 1963 من بوينغ (وهي طائرة مائية تقدم خدمة طيران وفق جدول محدد بين الساحل الغربي للولايات المتحدة وشرقي آسيا) أقوى بنحو 130 مرة قياساً بطائرة الأخوين رايت عام 1903، التي كانت نسبة وزنها إلى استطاعتها أكبر بعشر مرات من نظيرتها في طائرة كليبر (الشكل 5-17). أما العنفات الغازية، التي تمثل وسائط تحريك أساسية، جديدة كلياً فقد أحدثت ثورة في الطيران وكذلك في إنتاجية الكثير من الصناعات، إذ وضعت تصوراتها بشيء من التفصيل مع انطلاقة القرن العشرين، إلا أن أول تصاميم عملية لها لم تظهر إلا في أواخر ثلاثينيات القرن العشرين. فقد قام فرانك ويتل في إنجلترا وهانز بابست فون أوهاين في ألمانيا كل على حدة بصناعة عنفاتهم الغازية التجريبية لمصلحة الطائرات العسكرية، إلا أن أول طائرة حربية مزودة بمحرك نفاث دخلت الخدمة متأخرة جداً بحيث لم تُحدِث تأثيراً في موازين الحرب العالمية الثانية (كونستانت Constant أ1981؛ سميل 2010ب).

وظهر تطور سريع لوسائط تحريك أساسية جديدة بعد عام 1945. فقد اختُرقت سرعة الصوت لأول مرة في 14 أكتوبر/تشرين الأول 1947، بطائرة بيل إكس 1، وسُجلت أرقام جديدة لتصاميم المقاتلات والقاذفات الخارقة لجدار الصوت منذ أواخر أربعينيات القرن العشرين، حيث وصلت السرعة القصوى لأسرع مقاتلة - ميغ 35 - إلى 3.2 ماخ. أما انتشار العنفات الغازية فأتاح الطيران عبر القارات



الشكل 17-5

إن محركات الطائرات ذات القوة المتزايدة والوزن المتناقص يوماً تلو الآخر جعلت التطورات المتواصلة في الطيران ممكنة. فقبل أن تصل المحركات ذات المكابس إلى الحدود القصوى لأدائها، بدأت المحركات النفاثة بتطوراتها الملحوظة. فمحركات طائرات بوينغ وإيرباص تزن أقل من 0.1 غ/واط، أي أنها أفضل بمئة ضعف قياساً بمحرك رايت الرائد ذي المكابس. وتبقى المحركات المستخدمة في الطائرات الحربية أخف وزناً. أعد المخطط بناءً على بيانات كونستانت (1981، جوستن Gunston أ(1986)، تايلور Taylor أ(1989) وسميل (2010ب).

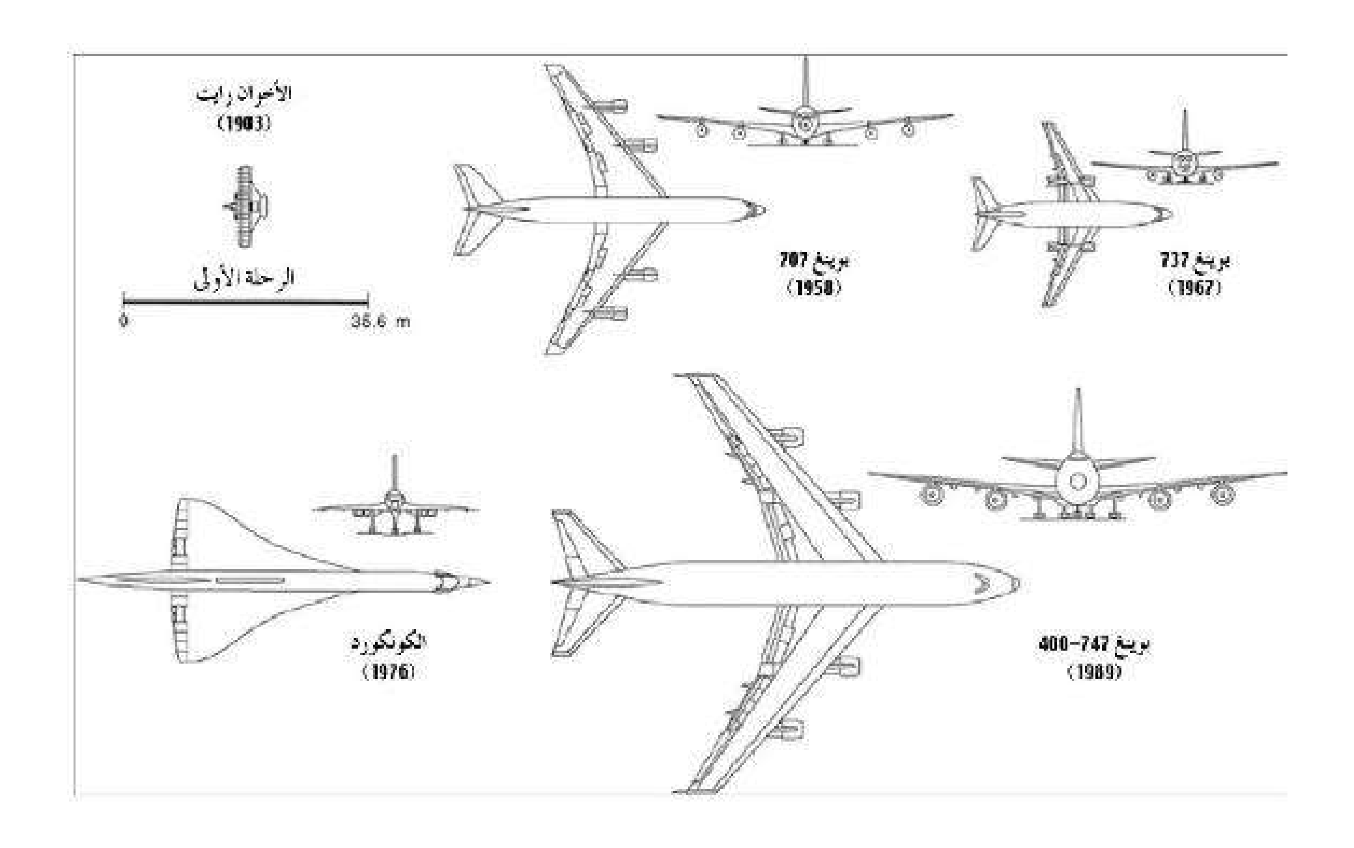
بتكاليف ميسورة. ولعل ما ميز التصميم المتطور لهذه وسائط التحريك الأولية التي تزداد كفاءة وقوة يوماً بعد يوم (الشكل 5-17) كان انخفاض نسبة الكتلة إلى الاستطاعة (بقوة دفع 500 كيلو نيوتن، لا تتجاوز 0.06 - 0.07 غ/واط) والنسبة المرتفعة للدفع/الوزن (<6 بالنسبة للمحركات التجارية، و8.5 لأفضل المحركات العسكرية)، ونسبة التخطي المرتفعة (عند 12: 1، وهي اليوم النسبة الأعلى، حيث يتم ضغط 92% من الهواء عبر المسارات التحويلية بعيداً عن غرفة الاحتراق؛ الأمر الذي يخفض الاستهلاك النوعي للوقود ويحد من ضجيج المحرك). كذلك باتت العنفات الغازية المستخدمة في الطيران على درجة كبيرة من الثبات بحيث إن الطائرات ذات

المحركين لم تتمكن من الطيران عبر الأطلسي فحسب، بل على كثير من الخطوط العابرة للمحيط الهادي أيضاً (سميل 2010ب).

وكما هي الحال غالباً مع الصناعات التي وصلت إلى مرحلة النضج، باتت السوق العالمية للمحركات النفاثة محكومة بأربع شركات مصنعة فقط. رولز رويس كانت أول شركة تسوق للمحركات التجارية عام 1953، تبعتها شركتان أمريكيتان هما جنرال إلكتريك وبرات وويتني، وشركة CFM الدولية، وهي شركة أسستها جنرال إلكتريك وشركة سنيكما موتور الفرنسية عام 1974 المختصة في صناعة محركات الطائرات قصيرة المدى ومتوسطة المدى (CFM الدولية 2015). من ناحية أخرى، كانت رحلات الطيران على متن طائرات الكونكورد الأسرع من الصوت (التي دخلت الخدمة التجارية عام 1976) باهظة التكاليف جداً بحيث عجزت عن اللحاق بتلك السوق، ما أدى إلى انتهاء خدمتها عبر الأطلسي عام 2003 (دارلينج 2004).

صارت طائرة «بريتيش كوميت» أول طائرة نفاثة للركاب عام 1952، إلا أن العيوب التي ظهرت في هيكلها، وليس في محركها، أسفرت عن ثلاثة حوادث قاتلة، ما أدى إلى إخراجها من الخدمة. لكن الطائرة التي أعيد تصميمها عاودت طيرانها عام 1958 لكنها لم تكلل بالنجاح على المستوى التجاري (سايمونز 2014). أما أول طائرة نفاثة تجارية ناجحة فكانت بوينغ 707، حيث دخلت الخدمة عام 1958 (الشكل 5-18). وبدأت أول طائرة بوينغ 747 عريضة الجسم الطيران عام 1969، فقد زودت هذه الطائرة النفاثة الأيقونة عريضة الجسم بمحركات ذات مراوح توربينية أعطت أكثر من 200 كيلو نيوتن من الدفع، تصل قوتها الدافعة مجتمعة إلى نحو 280 ميغا واط عند الإقلاع (سميل 2000 ج). وبحلول عام 2015، أعطى أقوى محرك نفاث GE 90-115B، أ513 كيلو نيوتن من القوة الدافعة.

أما وسائط التحريك الأولية الوحيدة التي بوسعها توليد استطاعة في وحدة الوزن أكبر من العنفات الغازية فهي المحركات الصاروخية التي تطلق الصواريخ والمركبات الفضائية. وأصاب رواد علم الصواريخ الحديث - كونستانتين



الشكل 5-18

مخططات ومساقط أمامية لطائرات نفاثة بارزة. اعتمدت بوينغ 707 (1957) على ناقلة وقود لإعادة التغذية جواً. بوينغ 737 (1967) هي الطائرة النفاثة الأفضل في كل زمان (تم تسليم قرابة 9.000 طائرة مع نهاية 2015، وطلب 13.000 غيرها). أما طائرة الكونكورد الفرنسية - البريطانية الأسرع من الصوت، والتي طارت وفق خطوط محدودة بين عامي 1976 و2003، فاتسمت بغرابتها وارتفاع تكاليفها. بينما كانت طائرة بوينغ 747 (التي دخلت الخدمة منذ عام 1969) أول طائرة عريضة الجسم مخصصة للرحلات الطويلة. ونضع في هذا المخطط التوضيحي طائرة الأخوين رايت ومسار طيرانها الكلي بتاريخ 7 ديسمبر/كانون الأول 1903 للمقارنة. أُعد المخطط اعتماداً على إصدارات بوينغ وإيروسبايشل/Bae وعلى بيانات جاكاب Jakab أ(1990).

تسيولكوفسكي Konstantin Tsiolkovsky أ(1857-1935) في روسيا، وهيرمان أوبيرث (1894-1989) في ألمانيا، وروبرت جودارد (1882-1945) في الولايات المتحدة - في تخيلهم للنجاح الذي ستحرزه فكرة الاندفاع الصاروخي القديمة في نهاية المطاف، حيث ترجمها المهندسون في العصر الحديث إلى أقوى وسائط التحريك الأولية (هنلي Hunley أ1995؛ أنجيلو

Angelo أ2003؛ تايلور 2009). وبدأت التطورات السريعة خلال الحرب العالمية الثانية، ففي عام 1942 وصل الصاروخ الألماني V-2 الذي يعمل بالإيثانول والذي صممه فيرنر فون براون Wernher von Braun أ(1912-1977) إلى قوة دفع عند مستوى سطح البحر بلغت 249 كيلو نيوتن (ما يعادل نحو 6.2 ميغا واط، بنسبة كتلة إلى الاستطاعة بلغت 0.15 غ/واط) وبسرعة قصوى 1.7 كم/ثا، بينما كان مداه البالغ 340 كم كافياً لمهاجمة المملكة المتحدة (فون براون وأوردواي 1975).

وبدأ السباق الفضائي بين القوى العظمى بإطلاق أول قمر اصطناعي للأرض، عام 1957، عرف باسم سبوتنيك السوفيتي. وتزايد إنتاج هذه القوى من الصواريخ البالستية العابرة للقارات التي تتسم بمزيد من القوة والدقة أيضاً. ففي 16 يوليو/تموز 1969 عمل أحد عشر محركاً لصاروخ ساترن C-5 الأمريكي الذي يعتمد على احتراق الكيروسين والهيدروجين (والذي كان مصممه الأساسي فيرنر فون براون أيضاً) على إطلاق المركبة الفضائية أبولو في رحلتها إلى القمر، حيث أشعلت هذه المحركات لمدة 150 ثانية فقط، لتصل بذلك قوة دفعها مجتمعة إلى قرابة 36 ميغا نيوتن، ما يعادل 2.6 جيغا واط، أما نسبة الكتلة إلى الطاقة (بما في ذلك وزن الوقود وثلاثة صواريخ معززة) فكانت 0.0001 غ/واط (تايت Tate أ2009).

الفصل السادس
حضارة الوقود الأحفوري

ثمة مفارقة جلية بين المجتمعات التي عاشت ما قبل العصر الصناعي واستطاعت فعلياً استثمار الطاقة الشمسية المباشرة، من خلال تحويل جزء يسير ومهمل من الإشعاع الوارد غير النضوب من الناحية العملية، وبين الحضارة الحديثة التي تعتمد على استخراج كمّ هائل من مخزون الطاقة، مستنزفة بذلك رواسب الوقود الأحفوري المحدودة وغير المتجددة حتى خلال فترة زمنية تزيد بقيم أسية عن فترة استمرار وجود نوعنا البشري. أضف إلى ذلك الاعتماد على الانشطار النووي وتسخير الطاقات المتجددة (مع إضافة الكهرباء التي تولدها طاقة الرياح والخلايا الكهرضوئية إلى الطاقة الكهرمائية، والتحول إلى طرائق جديدة لتحويل الكتلة النباتية الحيوية إلى وقود) الذي يشهد تزايداً ملحوظاً، لكن لا يزال الوقود الأحفوري يشكل 86% من الطاقة الأولية على مستوى العالم عام 2015، رغم انخفاضه بنسبة لا تتجاوز 4% عن نظيرتها المسجلة قبل جيل من الزمن وتحديداً في عام 1990 (الشركة البريطانية للنفط 2016).

فمع تحولنا إلى هذا المخزون الغني، أرسينا أسس مجتمعات تحول كميات غير مسبوقة من الطاقة، ما أدى إلى تطورات هائلة على صعيد الإنتاجية الزراعية وغلال المحاصيل. وتمثلت النتيجة التي ظهرت أولاً في تحول سريع طال الصناعة والتحضر، فضلاً عن اتساع نطاق النقل وتسريعه، ونمو مهيب في قدراتنا على مستوى المعلومات والتواصل، حيث اجتمعت هذه التطورات كافة لإنتاج معدلات نمو اقتصادي مرتفعة استمرت لفترات طويلة واستطاعت إيجاد حالة من الرخاء الحقيقي، ناهيك عن تمكنها من رفع مستوى معيشة لدى جلّ سكان العالم، لتنتج في آخر المطاف اقتصادات جديدة قائمة على خدمات الطاقة المرتفعة.

إلا أن استخدام هذه الطاقة الجديدة اقترن بالكثير من التبعات المقلقة، كما أسفر عن تغيرات لو استمرت لعرضت أسس الحضارة الحديثة للخطر. وقد كان التحضر مصدراً رئيساً للابتكارات والتطورات التقنية، وتحقيق مكاسب على المستوى المعيشي، فضلاً عن اتساع أفق المعلومات، والتواصل الآني، لكنه كان أيضاً عاملاً أساسياً وراء تدهور الجودة البيئية ومصدر قلق إزاء انعدام المساواة في الدخل. كما حملت المضامين السياسية لتباين توزع مصادر الطاقة تبعات على الصعيد الداخلي وأخرى على الصعيد الدولي تراوحت من حالات خلافات إقليمية إلى ظهور أنظمة اتسمت بديمومة فسادها وبعدها عن التسامح في أغلب الأحيان أو لجوئها إلى اعتماد العنف الصرف.

أدت الأسلحة الحديثة ذات الطاقة العالية إلى رفع القدرة التدميرية لدى الأمم بقيم أسية فاقت بأشواط قدرات سلفها من الأسلحة خلال الفترة التي سبقت العصر الصناعي، وعليه، لم تشهد الصراعات المسلحة الحديثة زيادات في الإصابات بين العسكريين فحسب، بل طالت تلك الزيادات المدنيين

أيضاً. وفوق ذلك كله، أدى تطور الأسلحة النووية لأول مرة في التاريخ إلى ظهور إمكانية شل كامل الحضارة إن لم نقل تدميرها بالكامل. في الوقت نفسه، لا تتطلب بعض من أشرس الوسائل العدوانية والحربية الحديثة سيطرة متفوقة على طاقات مركزة نظراً لاعتمادها على سبل الإرهاب الفردي التي صمدت أمام اختبار الزمن. لكن حتى مع ضمان تجنب الحضارة الحديثة لصراع نووي حراري واسع النطاق، ستبقى مرهونة لحالات انعدام اليقين بشكل بالغ. وما لا شك فيه أن أكبر التحديات المقلقة يكمن في تفشي ظاهرة التدهور البيئي. فهذا التغير السريع يعود إلى استخراج الوقود الأحفوري والطاقات غير الأحفورية وتحويلها، وكذلك إلى الإنتاج الصناعي والتحضر بوتيرة سريعة والعولمة الاقتصادية، ناهيك عن قطع الغابات والممارسات غير المناسبة المتبعة في زراعة المحاصيل وتربية الحيوانات.

أما التأثيرات التراكمية لهذه التغيرات فلم تنحصر فقط في مشكلات محلية وإقليمية، بل امتدت إلى تأثيرات من شأنها زعزعة الاستقرار لما تحدثه من تغيرات في المحيط الحيوي العالمي، وعلى رأسها التبعات السيئة الناجمة عن ارتفاع حرارة الأرض بوتيرة سريعة نسبياً. لقد تمكنت الحضارة الحديثة من هندسة انفجار حقيقي في استخدام الطاقة وبسطت سيطرة الإنسان على الطاقات غير الحية لتصل إلى مستويات اعتبرت سابقاً خارج نطاق التفكير. أما المكاسب المذكورة فقد جعلت من هذه الحضارة حضارة تحررية رائعة وبناءة لدرجة تستحق الإعجاب، لكنها في الوقت عينه تسببت في خلق عقبات لا تبعث على الارتياح، وأحدثت دماراً هائلاً، ناهيك عن أنها اتسمت بهزيمتها للذات بكثير من الطرائق. وقد أدت كل هذه التغيرات إلى نمو اقتصادي راسخ لأجيال، وتوقعات بأن نهاية هذه العملية - التي تغذيها ابتكارات متواصلة - لن تكون قريبة، وأن استمرارها مؤكد لا محالة.

القوة غير المسبوقة واستعمالاتها

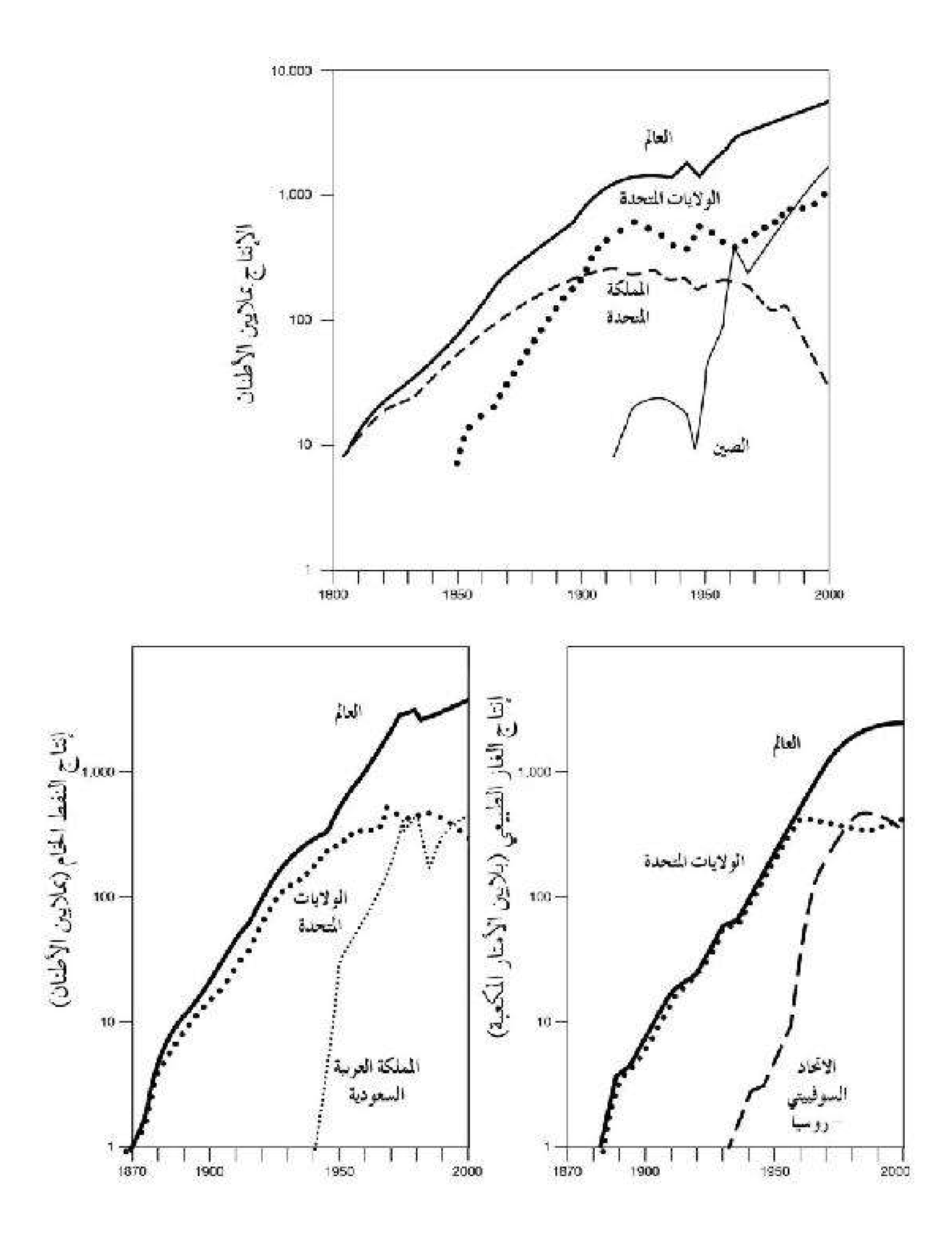
رغم انقطاع نمو الطاقة عالمياً إبان الحربين العالميتين، وخلال أسوأ أزمة اقتصادية شهدها العالم في ثلاثينيات القرن الماضي، إلا أنه عاود اتجاهه الصاعد بمعدلات غير مسبوقة خلال العقود السبعة الأولى من القرن العشرين. ليُسجل بعد ذلك تباطؤاً فرضه إقدام أوبك على رفع أسعار النفط بنحو خمسة أضعاف ما بين أكتوبر/تشرين الأول 1973 ومارس/آذار 1974. إلا أن هذا النمو كان سيشهد تباطؤاً حتى من دون هذه الهزة نظراً لأن مستوياته المطلقة باتت أكبر من قدرتها على دعم معدلات النمو الممكنة عند إجمالي المستويات الأدنى. لكن التغيرات الكمية الهائلة تواصلت (بوتيرة أبطأ) ورافقها بعض من المكاسب النوعية الجديدة والملحوظة. أما أفضل ما تم جمعه من إحصائيات عالمية فيشير إلى أن بداية النمو الأسي المتواصل في إنتاج الوقود الأحفوري منذ استخراجه على نطاق واسع تعود إلى القرن التاسع عشر (سميل Smil 2000أ، 2003، 2010أ؛ الشركة البريطانية للنفط؛ الشكل 6-1).

حقق استخراج الفحم نمواً بنحو 100 ضعف، مرتفعاً بذلك من 10 ميغا طن إلى 1 جيغا طن بين عامي 1810 و1910؛ ليصل إلى 1.53 جيغا طن عام 1950، وإلى 4.7 جيغا طن عام

2000، و8.25 جيغا طن عام 2015، قبل أن يسجل تراجعاً طفيفاً لتصل كمية الفحم المستخرجة عام 2015 إلى قرابة 7.9 جيغا طن (سميل 2010ج؛ الشركة البريطانية للنفط 2016). كذلك شهد استخراج النفط الخام ارتفاعاً بنحو 300 ضعف، وذلك من أقل من 10ميغا طن في أواخر ثمانينيات القرن التاسع عشر، ليتجاوز بشكل طفيف 3 جيغا طن عام 1988؛ ويصل إلى 3.6 جيغا طن عام 2000 وإلى نحو 4.4 جيغا طن عام 2015 (الشركة البريطانية للنفط 2016). أما إنتاج الغاز الطبيعي فقد ارتفع بمقدار 1000 ضعف، من أقل من 2 جيغا م^3 في أواخر ثمانينيات القرن التاسع عشر إلى 2 تيرا م^3 بحلول 1991. وفي القرن التاسع عشر ازداد استخراج الطاقة الأحفورية على مستوى العالم بمقدار 14 ضعفاً وفق إجمالي قيم الطاقة.

إلا أن الطريقة التي تعتبر أفضل بأشواط لتتبع تلك الزيادات تكون في التعبير عن النمو من منظور الطاقة المفيدة، كالحرارة والضوء والحركة التي يتم توفيرها فعلياً. فكما شاهدنا آنفاً، اتسمت أولى عمليات تحويل الوقود الأحفوري ببعدها عن الكفاءة إلى حدّ ما (<2% بالنسبة للأضواء المتوهجة، <5% للقاطرات البخارية، <10% لتوليد الكهرباء بالطاقة الحرارية، و<20% لمواقد الفحم الصغيرة)، إلا أن التحسينات في المراجل والمواقد التي تعمل بالفحم سرعان ما ضاعفت من هذه الكفاءات، حيث تبقى إمكانية إحراز مزيد من المكاسب أكبر. ويتم تحويل الهيدروكربونات التي يتم حرقها في أفران منزلية وفي مراجل منشآت صناعية ومحطات الطاقة بمستوى أعلى من الكفاءات، وتبقى محركات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالبنزين المركبة في سيارات الركاب بعيدة نسبياً عن الكفاءة. أما حرق الغاز الطبيعي، سواء في الأفران أو في المراجل أو في العنفات فيتسم بكفاءة عالية، تزيد بصورة عامة على 90%، شأنه شأن عمليات تحويل الكهرباء الأولية.

وعليه، لم يتجاوز معدل الكفاءة المحسوبة لاستخدام الطاقة على المستوى العالمي



الإنتاج علايين الأطنان
العالم
الولايات المتحدة
المملكة المتحدة
الصين
إنتاج النفط الخام (علايين الأطنان)
العالم
الولايات المتحدة
المملكة العربية السعودية
إنتاج الغاز الطبيعي (بلايين الأمتار المكعبة)
العالم
الولايات المتحدة
الاتحاد السوفييتي
روسيا

الشكل 6-1

إجمالي الإنتاج العالمي والإنتاج السنوي لدى أكبر البلدان المنتجة لثلاثة أنواع أساسية من الوقود الأحفوري. أعد المخطط استناداً إلى بيانات منظمة الأمم المتحدة (1956)، سميل (2010أ) والشركة البريطانية للنفط (2015).

نسبة 20% في عام 1900؛ بينما وصل عام 1950 إلى أكثر من 35%، وبحلول عام 2015 وصل المتوسط العالمي لتحويل الوقود الأحفوري والكهرباء الأولية إلى 50% من إجمالي المدخلات التجارية: فحسابات الوكالة الدولية للطاقة (الوكالة الدولية للطاقة 2015أ) لعام 2013 تبين أن الإمداد الأولي على مستوى العالم بلغ 18.8 جيغا طن من مكافئ النفط، بينما وصل الاستهلاك النهائي إلى 9.3 جيغا طن من مكافئ النفط، حيث تكمن أعلى الخسائر تبعاً للتوقعات في توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية والنقل. ولعل الجانب الأبرز، في قطاع الاستهلاك الرئيس، ينحصر في التدفئة المنزلية، حيث شهد السكان كافة تحولاً جذرياً على مستوى الكفاءة في فترة لم تتجاوز بضعة عقود (المربع 6-1).

صحيح أن إجمالي الإمداد بأنواع كافة الطاقة الأحفورية وصل إلى 14 ضعفاً في القرن العشرين، إلا أن التقدم المتواصل أعطى طاقة مفيدة أعلى بنحو 30 ضعفاً قياساً بما كان متاحاً في عام 1900. نتيجة لذلك، باتت الأمم التي تنعم بالرخاء، حيث سيطر الوقود الأحفوري على إجمالي الإمداد عام 1900، تحصل على أكثر من ضعفي أو حتى ثلاثة أضعاف طاقتها المفيدة في وحدة الإمداد الأولي قياساً بما كانت عليه قبل قرن، ونظراً لأن أنواع تحويل الطاقة المستمدة من الكتلة الحيوية التقليدية كان يتم بكفاءات متدنية جداً (<1% للضوء و<10% للحرارة)، فقد باتت الأمم ذات الدخل المنخفض التي سادت فيها أنواع الطاقة الحديثة في النصف الثاني من القرن العشرين تحصل على طاقة مفيدة تصل من خمسة إلى عشرة أضعاف قيمها في وحدة الإمداد الرئيسة قياساً بالفترة قبل قرن من الزمن. أما على مستوى الفرد -إذا ما أخذنا بالحسبان عدد سكان العالم البالغ 1.65 مليار عام 1900 و6.12 مليار عام 2000- فنجد أن الزيادة العالمية في الإمداد بالطاقة المفيدة بلغ أكثر من ثمانية أضعاف، إلا أن هذا المتوسط يخفي بين طياته حالات تفاوت كبيرة على المستوى الوطني (حيث تجدون المزيد عن هذا الموضوع لاحقاً في هذا الفصل خلال مناقشة النمو الاقتصادي والمستوى المعيشي).

أما الطريقة الأخرى لتقدير إجمالي دفق الطاقة الحديثة فتكمن في مقارنتها

المربع 6-1

كفاءة التدفئة المنزلية

لفترة تقل عن 50 سنة، عشت في منزل دُفئ باستخدام أربعة أنواع مختلفة من الوقود، كما شهد تحولاً في كفاءة خدمة الطاقة الرئيسة وصل إلى ثلاثة أضعاف (سميل 2003). ففي أواخر خمسينيات القرن الفائت، عندما كنت أعيش في قرية محاطة بالغابات على مقربة من الحدود التشيكية البافارية اعتمدنا على الخشب في تدفئة منزلنا، شأننا في ذلك شأن السواد الأعظم من الجوار. وكان والدي يطلب جذوع أشجار التنوب أو الشوح الكاملة من دون قطع، حيث كانت المهمة المنوطة بي صيفاً أن أقطعها إلى قطع مناسبة لتذكية النار (وإلى قطع أصغر لإضرام النار)، ومن ثم تكديسها في مكان محمي لتجفيفها بالهواء. أما كفاءة مواقدنا الخشبية فكانت أعلى من 30-35%. وعندما درست في براغ، اعتمدت خدمات الطاقة كافة - كتدفئة المكان والطبخ وتوليد الكهرباء - على فحم الليغنيت، حيث كان لموقد الفحم في غرفتي، القابع داخل جدار سميك في مبنى كان ديراً ذات يوم، كفاءة بلغت نحو 45%. وعندما انتقلنا إلى الولايات المتحدة، استأجرنا الطابق العلوي لأحد المنازل الكائنة في إحدى الضواحي اعتمد في تدفئته على زيت الوقود الذي يتم إيصاله بواسطة شاحنة وحرقة في فرن مخصص لذلك بكفاءة لا تتعدى 60%. أما أول منزل كندي لنا فكان مجهزاً بفرن يعمل بالغاز الطبيعي بكفاءة بلغت 65%، لكن عندما صممت منزلاً جديداً بكفاءة ممتازة، قمت بتركيب فرن غاز طبيعي بكفاءة 94%، حيث استبدلنا به بعد ذلك فرناً آخر تصل كفاءته إلى 97%.

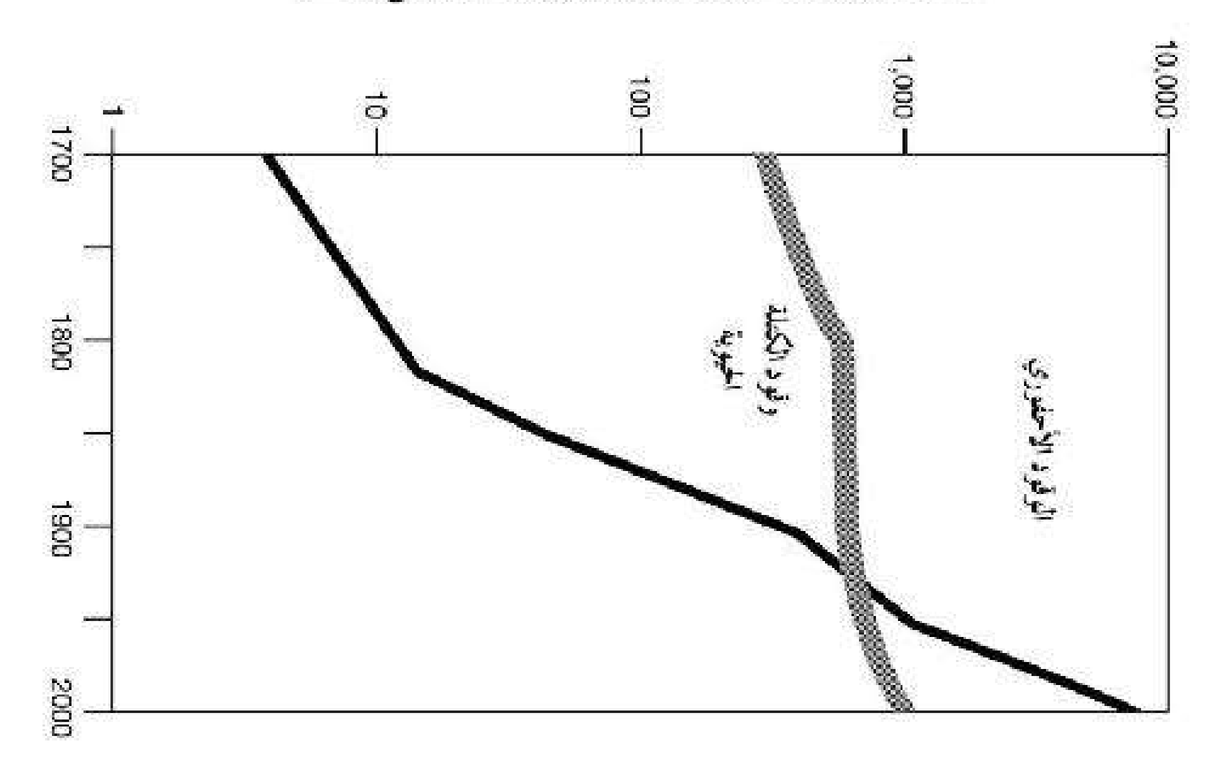
باستخداماتها التقليدية وفق القيمة المطلقة والنسبية. إذ تظهر التقديرات الفضلى ارتفاع إجمالي استهلاك وقود الكتلة الحيوية حول العالم من 700 ميغا طن عام 1700 إلى نحو 2.5 جيغا طن عام 2000. ما يعني زيادة من قرابة 280 ميغا طن إلى 1 جيغا طن وفق مكافئ النفط، أي أقل من أربعة أضعاف على مدى ثلاثة قرون (سميل 2010أ). وخلال الفترة عينها، ارتفعت كمية الوقود الأحفوري المستخرجة من أقل من 10 ميغا طن إلى نحو 8.1 جيغا طن وفق مكافئ النفط، أي بزيادة 800 ضعف (الشكل 6-2). أما من حيث إجمالي الطاقة، فقد كان الإمداد العالمي بالوقود الحيوي والوقود الأحفوري هو نفسه إلى حد ما عام 1900 (كلاهما بلغ قرابة 22 إكسا جول). وفي عام 1950 أعطى الوقود الأحفوري من الطاقة زهاء ثلاثة أضعاف ما أعطاه الخشب ومخلفات المحاصيل والروث. وفي عام 2000 وصل الفارق إلى قرابة ثمانية أضعاف. لكن عند تعديل القيمة وفق ما تم إيصاله فعلياً من الطاقة المفيدة، نجد أن الفرق عام 2000 قد وصل إلى زهاء 20 ضعفاً.

أسفرت زيادة توظيف الطاقة عن رفع معدل استهلاك الفرد للطاقة ووصوله إلى مستويات غير مسبوقة (الشكل 6-3). كانت الاحتياجات من الطاقة لدى المجتمعات الرعوية محكومة بتأمين الغذاء، حيث إن استهلاكها السنوي لم يتعد 5-7 جيغا جول/فرد. أما الثقافات القديمة الرفيعة فقد شهدت زيادة بطيئة في استخدام الطاقة لمصلحة تأمين مستوى أفضل من المأوى والملبس، وكذلك لمصلحة النقل (الذي يعمل بطاقة الغذاء والعلف والرياح)، فضلاً عن شتى الصناعات (وعلى

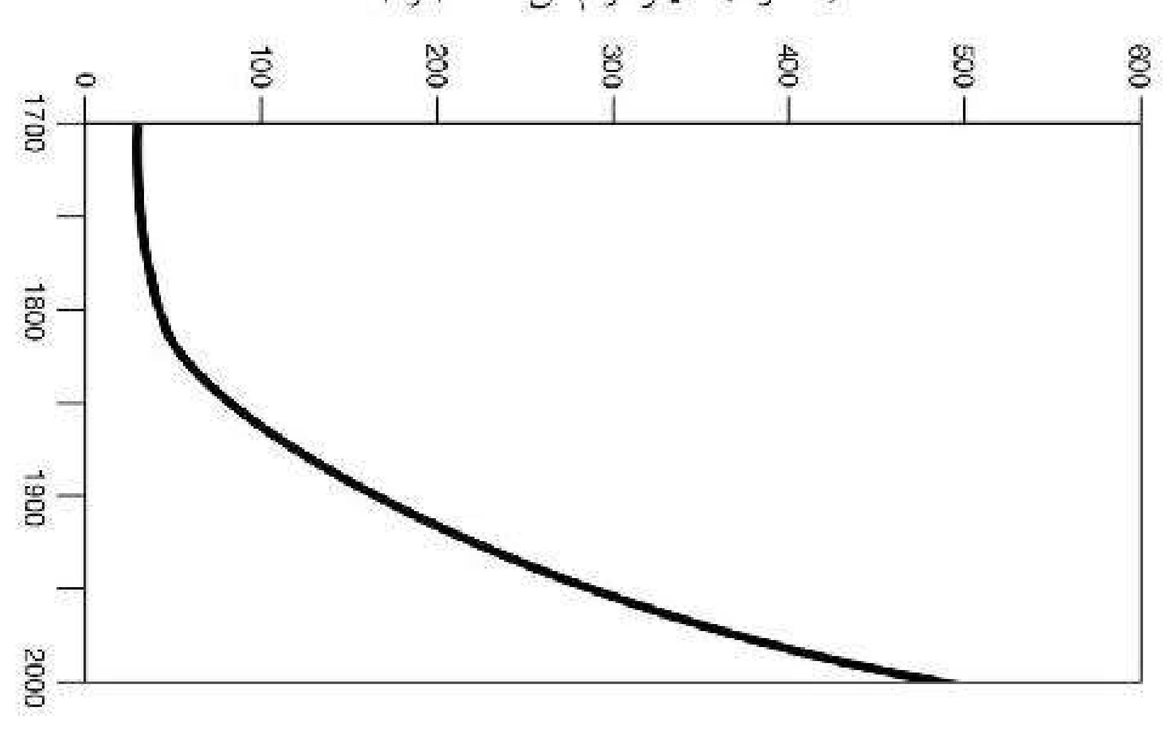
رأسها الفحم النباتي). أما معدل استهلاك مملكة مصر الحديثة فلم يتجاوز 10-12 جيغا جول/فرد، بينما أفضل تقديراتي لاستهلاك الإمبراطورية الرومانية فيبلغ 18 جيغا جول/فرد (سميل 2010ج). وقد تمكنت المجتمعات الصناعية الأولى من مضاعفة استخدام الفرد للطاقة بالشكل التقليدي. وكان جلّ هذه الزيادة من نصيب الصناعات والنقل التي تغذى بوقود الفحم. أما المعدلات الأوروبية بحسب مالانيما Malanima أ(2013ب) فقد حددت بنحو 22 جيغا جول/طن عام 1500، أعقبها فترة ركود بمعدل 16.6-18.1 جيغا جول/طن حتى عام 1800.

بعد ذلك ظهر تمايز واضح بين الأمم والبلدان الصناعية من جهة وتلك التي حافظت على صبغتها الزراعية بدرجة كبيرة من جهة أخرى. فنجد أن كاندر Kander أ(2013) يرفع متوسط استهلاك الفرد في إنجلترا وويلز من 60 جيغا جول/فرد عام 1820 إلى 153 جيغا جول/فرد عام 1910، بينما شهد معدل الاستهلاك الألماني زيادة بأكثر من خمسة أضعاف (من 18 إلى 86 جيغا جول/فرد)، في حين ارتفع المعدل

الطاقة الأولية المتاحة (مقدرة بملايين الأطنان من النفط)



الطاقة المفيدة المتاحة على النطاق العالمي
(مقدرة بالكيلوغرام من النفط/فرد)



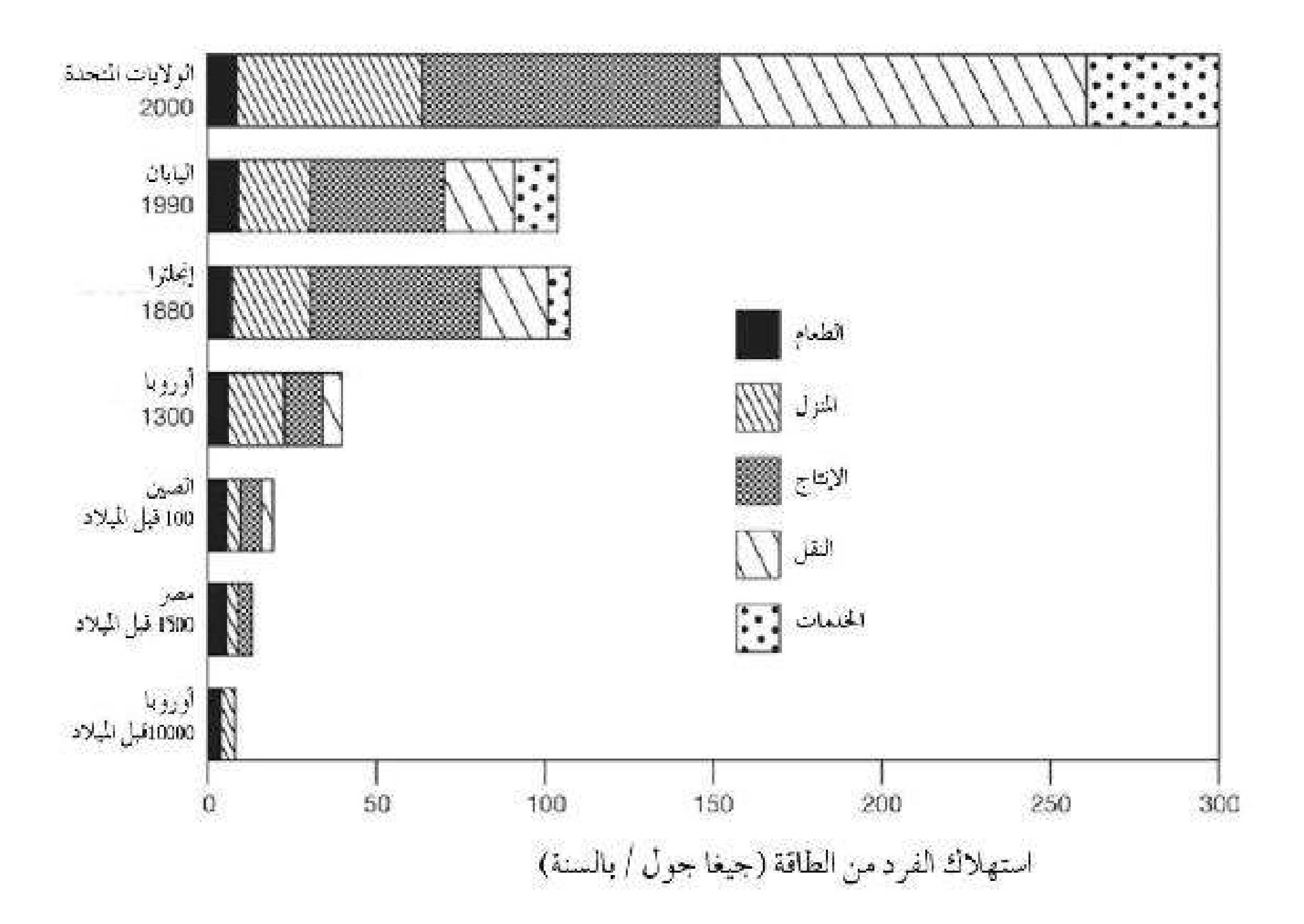
الشكل 6-2

تجاوزت المخرجات العالمية من الوقود الأحفوري مجمل الطاقة المتوافرة من الكتلة الحيوية التقليدية قبيل نهاية القرن التاسع عشر (إلى اليسار). وقد بلغت زيادة الطاقة المفيدة أكثر من ضعفي الزيادة في مجمل الكمية المتوافرة الأولية (إلى اليمين). مقتبسة من المعلومات التي نشرتها منظمة الأمم المتحدة (1956) وسميل (1983، 2010 أ).

الفرنسي بنحو ثلاثة أضعاف (من 18-54 جيغا جول/فرد)، إلا أن المعدل الإيطالي لم يرتفع إلا 20% (من 10 جيغا جول/فرد إلى مجرد 22 جيغا جول/فرد). وللمقارنة، ارتفع معدل استخدام الطاقة في الولايات المتحدة من أقل من 70 جيغا جول إلى نحو 150 جيغا جول بين عامي 1820 و1910 (شور Schurr ونيتشيرت Netschert أ1960). وبعد قرن من الزمن ارتفع استهلاك البلدان الأوروبية كافة الأغنى ليصل إلى أكثر من 150 جيغا جول/فرد، بينما تجاوز الاستهلاك في الولايات المتحدة 300 جيغا جول/فرد. ومع ارتفاع معدل نسب استهلاك الطاقة، نرى أن تركيبة مستخدميها تغيرت هي الأخرى (الشكل 6-3).

في مجتمعات الصيد والجمع كان الغذاء مصدر الطاقة الوحيد، حيث تضع تقديراتي الغذاء والعلف عند نسبة 45% تقريباً من إجمالي الطاقة مع بدايات الإمبراطورية الرومانية (سميل 2010ج). وفي أوروبا ما قبل العصر الصناعي تراوحت نسبة الطاقة المستمدة من الغذاء والعلف بين 20% و60%، لكن في عام 1820 لم يتجاوز المتوسط 30%؛ وفي عام 1900 كان أقل من 10% في كل من المملكة المتحدة وألمانيا. وبحلول ستينيات القرن الفائت تراجعت طاقة العلف إلى مستوى مهمل، في حين لم تتجاوز نسبة الغذاء من كامل الإمداد بالطاقة 3% وحتى من دون 2% في جلّ المجتمعات التي تنعم بالرخاء، حيث بات استهلاك الوقود والكهرباء هو السائد في قطاعي الصناعة والنقل وكذلك في القطاع المنزلي (الشكل 6-3). كما شهدت حصة الفرد من الكهرباء ارتفاعاً بنحو قيمتين أسيتين في اقتصادات الدخل المرتفع، فأصبحت عام 2010 قرابة 7 ميغا واط ساعي/سنة في أوروبا الغربية ونحو 13 ميغا واط ساعي/سنة في الولايات المتحدة. ولعل المفارقات بين تدفقات الطاقة الخاضعة لتحكم الأفراد مباشرة لا تقل أهمية عما ورد.

عندما كان أحد المزارعين في السهول العظمى يحكم قبضته على لجام ستة من الجياد الضخمة أثناء قيامه بحراثة حقله المخصص للقمح عام 1900، كان كل ما يتحكم به - وهو يبذل جهداً جسدياً وتلفه غمامة من الغبار في أثناء جلوسه على مقعد من الفولاذ



الشكل 3-6

مقارنات الاستهلاك السنوي النمطي للفرد من الطاقة خلال مراحل مختلفة من تطور الإنسان. اقترنت الزيادات الكبيرة في الاستهلاك المطلق بنمو نسب استخدام الطاقة في المنزل والصناعات والنقل. وقد اعتمدت القيم المتعلقة بالفترة السابقة للقرن التاسع عشر مجرد قيم تقريبية مبنية على سميل (1994، 2010ج) ومالانيما (2013أ)؛ الأرقام اللاحقة مأخوذة من مصادر إحصاء وطنية محددة.

- لا يزيد على 5 كيلو واط من القوة الحية. وبعدها بقرن، كان حفيده الجالس في كابينة الجرار المكيفة المريحة يتحكم من دون جهد في محرك ديزل تزيد قوته على 250 كيلو واط. وفي عام 1900، كان سائق قاطرة تعمل بالفحم وتجر قطاراً عابراً للقارات بسرعة تقرب من 100 كم/سا يقوم بتوظيف نحو 1 ميغا واط من قوة البخار، وهو الأداء الأعظمي المسموح به لتلقيم الفحم يدوياً (بروس Bruce أ1952؛ الشكل 6-4). بينما في عام 2000، كان بوسع طيارو بوينغ 747 التي تسافرعبر القارات على ارتفاع 11 كم اختيار وضعية الطيار الآلي خلال جزء كبير من

رحلتهم، حيث تولت أربع عنفات غازية توفير قوة بلغت نحو 120 ميغا واط بسرعة وصلت إلى 900 كم/سا (سميل 2000أ).

يتطلب تركيز القوة أيضاً مستوى أعلى من الإجراءات الاحترازية المتعلقة بالسلامة نظراً للتبعات التي تظهر بشكل حتمي على مستوى التحكم. إذ كان السائقون الجالسون أعلى العربات في رحلاتهم بين المدن في القرن التاسع عشر يتحكمون في العادة باستطاعة ثابتة لا تزيد على 3 ك واط (أربعة أحصنة ملجومة) لنقل 4-8 أشخاص؛ أما الطيارون على متن الطائرات النفاثة التي تحلق بين المدن فيتحكمون باستطاعة 30 ميغا واط من خلال محركات نفاثة لنقل 150-200 مسافر جواً. ثمة تباين كبير بين التبعات الناجمة عن الغفلة لبرهة أو الخطأ في الحُكم عندما يكون المشغل يتحكم باستطاعة 3 ك واط أو 30 ميغا واط، أي بفرق أربع قيم أسية. أما طريقة الحدّ من هذه المخاطر حداً واضحاً فتكمن في توظيف أجهزة تحكم إلكترونية.

لعل أكثر نظم النقل العام أماناً على الإطلاق حول العالم يتمثل في قطارشينكانسن *shinkansen* في اليابان الذي يصل بين طوكيو وأوساكا، حيث احتفل بالعام الخمسين على تدشينه من دون حوادث في 1 أكتوبر/تشرين الأول 2014 (سميل 2014ب). فمنذ البداية استخدمت في القطار أجهزة تحكم إلكترونية مركزية، حيث يبقي التحكم الآلي على مسافة مناسبة بين القطارات ويقوم مباشرة بتشغيل المكابح إذا ما تجاوزت السرعة الحد الأعظمي المطلوب؛ بينما يقوم تحكم مركزي خاص بالمرور بالتحكم بالمسار؛ في حين يستشعر نظام كشف الزلازل أول حركات زلزالية تصل إلى سطح الأرض، ويقوم إثرها بإيقاف حركة القطارات أو إبطائها قبل وصول الزلزال الرئيس (نوجوتشي Noguchi وفوجي Fujii أ2000). كما باتت الطائرات النفاثة الحديثة تعتمد نظماً آلية بشكل كبير منذ عقود، وكذلك سيارات الركاب التي باتت أجهزة التحكم المتطورة فيها شائعة اليوم. إن أجهزة التحكم الإلكتروني والمراقبة المستمرة - التي يتراوح مجال دخولها في حياتنا من موازين الحرارة المستخدمة في الغرفة إلى تشغيل أفران الصهر العملاقة، ومن نظام عدم إقفال المكابح في السيارات إلى نظام المراقبة الشامل بالكاميرات في المدن - قد ظهرت، إلى جانب اعتماد الحواسب والأجهزة الإلكترونية المحمولة على نطاق واسع، ما يشكل فئة أساسية جديدة للطلب على الكهرباء.

a.

b.

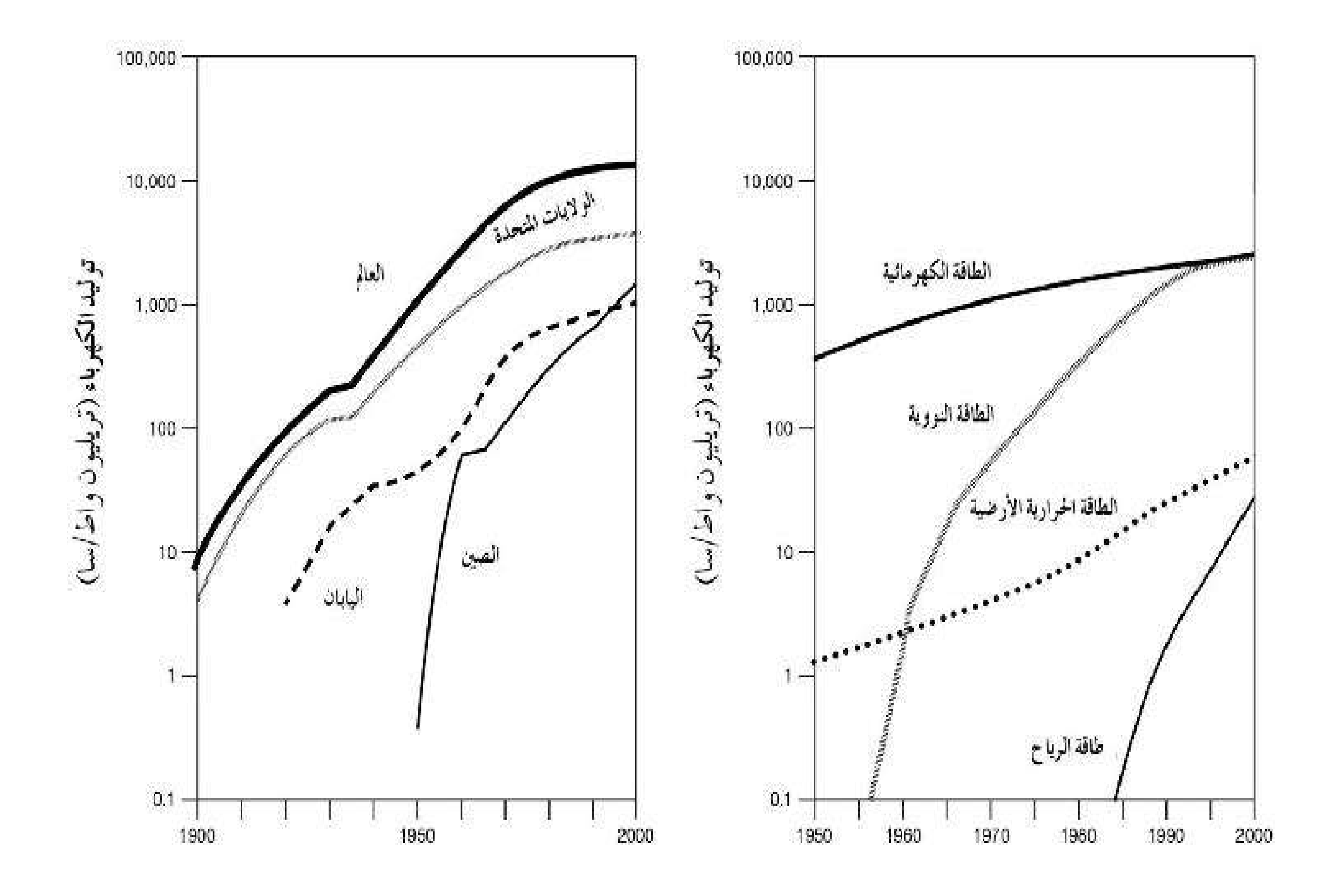


الشكل 6-4

تلقيم قاطرة بخارية في أواخر القرن التاسع عشر (الصورة العلوية) وقيادة طائرة نفاثة بوينغ (الصورة السفلية). كلا الطيارين يتحكمان بقوة أكبر بقيمتين أسيتين قياساً بما قام به الملقم والسائق في قاطرتهما. أخذت صورة القاطرة من محفوظات VS؛ وقمرة القيادة في طائرة بوينغ من الرابط: http://wallpapersdesk.net/wp-content/uploads/2015/08/2931_boeing_747.jpg.

تفوق النمو الذي شهده إنتاج الكهرباء على المستوى العالمي خلال القرن العشرين على اتساع نطاق استخراج الوقود الحيوي من حيث سرعته، حيث بلغ معدله السنوي نحو 3% (الشكل 6-5). وقد تم تحويل أقل من 2% من كامل الوقود إلى كهرباء عام 1900؛ في حين بقيت النسبة أقل من 10% عام 1945، لترتفع مع نهاية القرن إلى قرابة 25%. بالإضافة إلى ذلك عملت محطات كهرمائية (انتشرت على نطاق واسع عقب الحرب العالمية الأولى) واستطاعات نووية جديدة (منذ 1956) على توسيع نطاق توليد الكهرباء. ونتيجة لذلك، ارتفع الإمداد العالمي بالكهرباء بنسبة 11% في العام بين 1900 و1935، وبأكثر من 9% سنوياً بعد ذلك حتى سبعينيات القرن الماضي. إلا أن توليد الكهرباء شهد تراجعاً في الفترة المتبقية من القرن إلى نحو 3.5% سنوياً، ما يعزى بدرجة كبيرة إلى انخفاض الطلب لدى اقتصادات البلدان ذات الدخل المرتفع وارتفاع كفاءات التحويل. إلا أن الطرائق الجديدة لتوليد الكهرباء من مصادر متجددة كالطاقة الشمسية والرياح لم تشهد تطورات ملحوظة إلا مع أواخر ثمانينيات القرن المنصرم.

ليس من المكاسب المتمخضة عن هذه الطاقة أهم من الزيادة الكبيرة التي شهدها إنتاج الأغذية على مستوى العالم، الأمر الذي وفر تغذية كافية لنحو 90% من سكان العالم (منظمة الأغذية والزراعة 2015ب). كما لا يوجد تغيير وضع المجتمعات الحديثة ضمن قالب محدد أكثر من عملية التحول الصناعي، فأي من التطورات الحديثة لم تسهم في ظهور الحضارة العالمية المتآزرة أكثر ما فعل تطور النقل الجماعي والتوسع الهائل في سعات تخزين المعلومات والانخراط في التواصل بوتيرة وكثافة لم يسبق لهما مثيل عبر التاريخ. إلا أن هذه المكاسب المهيبة لم تُقتسم بين الشعوب بعدالة، حيث سأعمل على دراسة المدى الذي وصل إليه انعدام تكافؤ النمو الاقتصادي العالمي لدى الأقليات بين سكان العالم، وسأشير إلى غياب العدالة إلى حدّ كبير ضمن المستوى الوطني عينه. لكن رغم ذلك سُجلت عالمياً حالات تحسن كثيرة.



توليد الكهرباء (تريليون واط/سا)
100,000
10,000
1,000
100
10
1
0.1
1900
1950
2000
العالم
الولايات المتحدة
اليابان
الصين
توليد الكهرباء (تريليون واط/سا)
100,000
10,000
1,000
100
10
1
0.1
1950
1960
1970
1960
1990
2000
الطاقة الكهرمائية
الطاقة النووية
الطاقة الحرارية الأرضية
طاقة الرياح

الشكل 5-6

يشهد توليد الكهرباء على المستوى العالمي نمواً تفوق سرعته سرعة استخراج الوقود الأحفوري بأشواط. وقد كانت الاقتصادات الأكبر هي المنتج الرائد للكهرباء، حيث يبقى توليد الكهرباء الحرارية (واعتماداً على الفحم والغاز الطبيعي بدرجة كبيرة اليوم) هو السائد على مستوى الإنتاج العالمي (اليسار). أما توليد الكهرباء من الطاقة الكهرمائية والطاقة النووية فيحتل المرتبة الثانية والثالثة على التوالي، في حين شهد توليد الكهرباء من طاقة الرياح والطاقة الشمسية زيادة سريعة في أعقاب عام 2000 (اليمين). اعتمد المخطط على بيانات منظمة الأمم المتحدة (1956)، وبلجرايف مكميلان Palgrave Macmillan أ(2013) والشركة البريطانية للنفط (2015).

الطاقة في الزراعة

باتت أنواع الوقود الأحفوري والكهرباء مستلزمات لا سبيل إلى الاستغناء عنها في الزراعة الحديثة، إذ تستخدم بشكل مباشر في إمداد الآليات بالطاقة وغير مباشر في صناعتها، واستخراج الأسمدة المعدنية، وصناعة مركبات النيتروجين، إلى جانب صناعة مجموعة متنوعة من الكيميائيات الزراعية الوقائية الآخذة بالاتساع على نحو مطرد (كمبيدات الآفات، والمبيدات الفطرية، ومبيدات الأعشاب)، واستنباط أصناف محاصيل جديدة، ومؤخراً لتغذية الأجهزة الإلكترونية المستخدمة في كثير من العمليات الداعمة للزراعة الدقيقة بالطاقة. وقد أدى استخدام الوقود الأحفوري والكهرباء إلى إنتاج كمّ أكبر من الغلال التي يُعتمَد عليها. فقد حلت افتراضياً محل حيوانات الجر كافة في جميع البلدان الغنية، في حين خفضت من أهمية تلك الحيوانات بدرجة كبيرة في البلدان الفقيرة، وأدى استبدال محركات الاحتراق الداخلي والمحركات الكهربائية بالطاقة العضلية إلى دعم حركة الحدّ من العمالة التي بدأت تشهدها التطورات الزراعية ما قبل العصر الصناعي.

بدأ دعم الوقود الأحفوري غير المباشر المخصص للزراعة (على نطاق صغير جداً) في القرن الثامن عشر حين تحول اعتماد صهر فلزات الحديد من الفحم النباتي إلى الكوك، واتسعت عملية التحول هذه مع اعتماد الآليات الفولاذية خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر، لتصل بذلك إلى مستويات جديدة مرتفعة رافقت إدخال جيل أقوى وأضخم من الآليات الحقلية والمضخات المخصصة للري والمعدات اللازمة لمعالجة المحاصيل وتربية الحيوان في القرن العشرين. إلا أن تكاليف الطاقة الناجمة عن استخدام تلك الآليات تبقى جزءاً من الطاقة المستخدمة مباشرة لتشغيل الجرارات وآليات الجمع والحصاد، وغيرها من الحصادات، المستخدمة أيضاً لضخ المياه وتجفيف الحبوب ومعالجة المحاصيل. ونظراً للكفاءة العالية الملازمة لمحركات الديزل نجد أن هذه

المحركات هيمنت على الاستخدامات آنفة الذكر كافة، لكن يبقى البنزين والكهرباء من المستلزمات الرئيسة الأخرى للطاقة أيضاً.

بدأ استخدام محركات الاحتراق الداخلي في الآليات الحقلية داخل الولايات المتحدة أولاً، وذلك خلال العقد نفسه الذي باتت به سيارات الركاب سلعة تنتج بكميات كبيرة (ديفنباخ Dieffenbach وجراي Gray أ1960). وأنشئ أول مصنع أمريكي للجرارات عام 1905؛ كما أدخلت وحدات الإمداد بالطاقة لإقلاع الملحقات الموصولة عام 1919 بينما أدخلت المصاعد الكهربائية ومحركات الديزل والإطارات المطاطية في مطلع ثلاثينيات القرن العشرين. وتباطأ تطور الميكنة في أوروبا حتى خمسينيات القرن الماضي. أما في البلدان المكتظة في آسيا وأمريكا اللاتينية، فلم يبدأ هذا التطور فعلياً إلا خلال ستينيات القرن الماضي، في حين لا تزال عملية التحول قائمة في كثير من البلدان الفقيرة. وقد كانت ميكنة الأعمال الحقلية السبب الرئيس وراء ارتفاع الإنتاجية وتراجع عدد العاملين في الزراعة. ففي مطلع القرن العشرين كان الحصان الغربي القوي يعمل بمعدل لا يقل عن عمل ستة رجال، لكن حتى الجرارات في أوائل عهدها كانت تعمل باستطاعة تعادل بين 15-20 حصاناً ثقيلاً، بينما تصل استطاعة أقوى الآليات التي تعمل في الأراضي الكندية إلى 575 حصاناً (فيرساتايل Versatile أ2015).

شرحت في الفصل الثالث كيف خفض ارتفاع الإنتاجية معدل مستلزمات العمل بالنسبة لزراعة القمح الأمريكية من نحو 30 ساعة/طن من الحبوب عام 1800 إلى أقل من 7 ساعات/طن عام 1900؛ وبحلول عام 2000 انخفض المعدل إلى نحو 90 دقيقة. إلا أن هذه العمالة المحررة وجدت سبيلها إلى المدن كنتيجة حتمية، ما أسفر عن تراجع في أعداد سكان الريف حول العالم مع استمرار ارتفاع معدلات التحضر (نستعرض هذه الجزئية لاحقاً في هذا الفصل). وورد في الإحصائيات الأمريكية توضيحاً لموجات النزوح المذكورة. إذ انخفضت العمالة الريفية في البلد بأكثر من 60% من إجمالي قوى العمل عام 1850، وإلى أقل من 40% عام 1900، لتصبح النسبة 15% عام 1950، ومجرد 1.5 عام 2015 (وزارة العمل الأمريكية 2015). وعلى سبيل المقارنة، تبلغ نسبة العمالة الزراعية في الاتحاد الأوروبي اليوم نحو 5% من إجمالي العمالة، بينما لا تزال في الصين 30%.

وصل عدد خيول الجر الأمريكية إلى أعلى مستوى له عام 1915، مسجلاً 21.4 مليون رأس، إلا أن عدد البغال لم يصل إلى ذروته إلا في عامي 1925 و1926 مسجلاً 5.9 مليون رأس (مكتب الإحصاء الأمريكي 1975). وخلال العقد الثاني من القرن العشرين كان إجمالي عدد حيوانات الجر نحو عشرة أضعاف عدد الجرارات الحديثة؛ لكن استطاعة هذين النوعين من وسائط التحريك الأولية تساوت عام 1927، لينخفض إجمالي عدد الحيوانات إلى النصف عام 1940. إلا أن الميكنة وحدها لم تكن لتحرر الكثير من العمالة الريفية. إذ كان من الضروري أيضاً جني غلال مرتفعة للمحاصيل جراء اعتماد أصناف جديدة تتسم بقدرتها على الاستجابة لكم أكبر من عمليات التسميد واستخدام مبيدات الأعشاب ومبيدات الآفات، والري على مساحات أوسع.

صيغت أهمية الإمداد المتوازن بالمغذيات النباتية من قبل جستس فون ليبيج Justus von Liebig أ(1803-1873) عام 1873 حيث باتت هذه الصيغة تعرف بقانون الحد الأدنى

الخاص بـ ليبيج: ويعني أن العنصر الغذائي ذا الحد الأدنى هو العنصر المحدد للغلة. ومن بين المغذيات الثلاثة كبيرة المقدار (أي العناصر المطلوبة بكميات كبيرة نسبياً)، كالنيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم، لم يكن من الصعب توفير الفوسفور والبوتاسيوم. وفي عام 1842 أدخل جون بينيت لويس John Bennett Lawes أ(1814-1900) معالجة صخور الفوسفات بحمض الكبريت المخفف لإنتاج الفوسفات الحمضية (سوبرفوسفات)، ما أدى إلى اكتشاف رواسب فوسفات ضخمة في فلوريدا (1888) والمغرب (1913) بينما كان بالإمكان استخراج البوتاس (KCl) من أي موقع في أوروبا وأمريكا الشمالية (سميل 2001).

أما التحدي الأكبر فكان الإمداد بالنيتروجين، العنصر الغذائي المطلوب بكميات كبيرة في وحدة الأرض المزروعة بالمحصول. فلغاية تسعينيات القرن التاسع عشر، كان الخيار اللاعضوي الوحيد يكمن في استيراد النترات التشيلية (المكتشفة عام 1809). بعد ذلك بدأ استخراج كميات صغيرة نسبياً من سلفات الأمونيوم كمنتج ثانوي من أفران حرق فحم الكوك. ودخل تصنيع السياناميد الباهظ (من خلال تفاعل الكوك مع الجير لإنتاج كربيد الكالسيوم، والذي أعطى تركيبه مع النيتروجين الصرف سياناميد الكاليسوم) الساحة التجارية في ألمانيا عام 1898؛ وفي مطلع القرن العشرين استخدمت القوس الكهربائية (عملية بيركيلاند - آيد Birkeland-Eyde، أ1903) لإنتاج أكسيد النيتروجين، ليتم تحويله إلى حمض نتريك ونترات. إلا أن أياً من هذه الطرائق لم ينجح في الإمداد بكميات محددة من النيتروجين على نطاق واسع، لكن النظرة الاستشرافية حيال تغذية العالم بالنيتروجين شهدت تغيرات جسيمة عام 1909 مع اختراع فريتز هابر Fritz Haber أ(1868-1934) لمحفز، تمثل في عملية ضغط مرتفع لتركيب الأمونيا من عناصرها (سميل 2001؛ ستولتزينبيرغ Stoltzenberg أ2004).

بدأ تداول الأمونيا تجارياً (بحلول عام 1913) في مصنع BASF الواقع في مدينة لودفيجسهافن بقيادة كارل بوش (1874-1940). إلا أن أول استخدام عملي لهذه العملية لم يكن لإنتاج الأسمدة، بل لإنتاج نترات الأمونيوم لصناعة المتفجرات خلال الحرب العالمية الأولى. أما أول أسمدة آزوتية مركبة فقد بيعت في مطلع عشرينيات القرن العشرين. وبقي إنتاجها محدوداً قبل الحرب العالمية الثانية، في حين لم يستخدم ما يربو على ثلث المزارعين الأمريكيين أي أسمدة تركيبية حتى عام 1960 (شليبيكر Schlebecker أ1975). وتتطلب عملية تركيب الأمونيا وما يتبعها لاحقاً من خطوات تحويلها إلى أسمدة سائلة وصلبة طاقة مكثفة، إلا أن التطورات التقنية خفضت من إجمالي تكاليف الطاقة وأتاحت إمكانية استخدام المركبات النيتروجينية في جميع أنحاء العالم لتصل كميتها إلى مكافئ نحو 100 ميغا طن آزوت بحلول عام 2000، أي ما يعادل قرابة 80% من إجمالي المواد التركيبية للمركب (المربع 6-2، الشكل 6-6).

لا يوجد على مستوى استخدام الطاقة ما يعطي أكله أكثر من زيادة غلال المحاصيل إثر استخدام النيتروجين التركيبي، فباستخدام نحو 1% من الطاقة العالمية، بات بالإمكان اليوم الإمداد بقرابة نصف النيتروجين الذي تستخدمه المحاصيل في أنحاء العالم. ونظراً لأن زهاء ثلاثة أرباع إجمالي كمية النيتروجين الموجودة في البروتينيات الغذائية يأتي من أراضٍ صالحة للزراعة، نجد أن نحو

40% من الإمداد العالمي الراهن بالغذاء يعتمد على عملية تركيب الأمونيا التي أوجدها هابر- بوش Haber-Bosch.

المربع 6-2

تكاليف الطاقة المطلوبة لإنتاج الأسمدة النيتروجينية

تشتمل متطلبات الطاقة لتركيبة هابر- بوش على أنواع الوقود والكهرباء المستخدمة في العملية وكذلك على الطاقة المدمجة في مواد التغذية. واحتاجت عملية إنتاج تركيبة هابر- بوش القائمة على فحم الكوك في أول محطات BASF التجارية ما يزيد على 100 جيغا جول/طن من الأمونيا (NH3) عام 1913؛ لتنخفض النسبة قبل الحرب العالمية الثانية إلى نحو 85 جيغا جول/طن NH3. وبعد عام 1950 أدت العمليات المعتمدة على الغاز الطبيعي إلى خفض إجمالي تكاليف الطاقة إلى 50-55 جيغا جول/طن NH3. وأدت ضواغط الطرد المركزي وإعادة تشكيل البخار بالضغط العالي واستخدام وسيط أفضل إلى خفض المتطلبات في البداية إلى أقل من 40 جيغا جول/طن خلال سبعينيات القرن الماضي، ومن ثم إلى نحو 30 جيغا جول/طن بحلول عام 2000، حيث لم تحتج أفضل المحطات إلا إلى قرابة 27 جيغا جول/طن NH3، أي ما يقارب الطاقة اللازمة لجمع العناصر (20.8 جيغا جول/طن) لتركيب الأمونيا (كونجسهاوج Kongshaug 1998أ؛ سميل 2001). وتستخدم المحطات الأنموذجية الجديدة القائمة على الغاز الطبيعي 30 جيغا جول/طن NH3، وأكثر بنحو 20% عند استخدام زيت وقود ثقيل، وحتى قرابة 48 جيغا جول/طن NH3 لإنتاج تركيبات اعتماداً على الفحم (رافيكل Rafiqul وآخرون. 2005؛ نويلكر Noelker وروثر Ruether 2011أ).

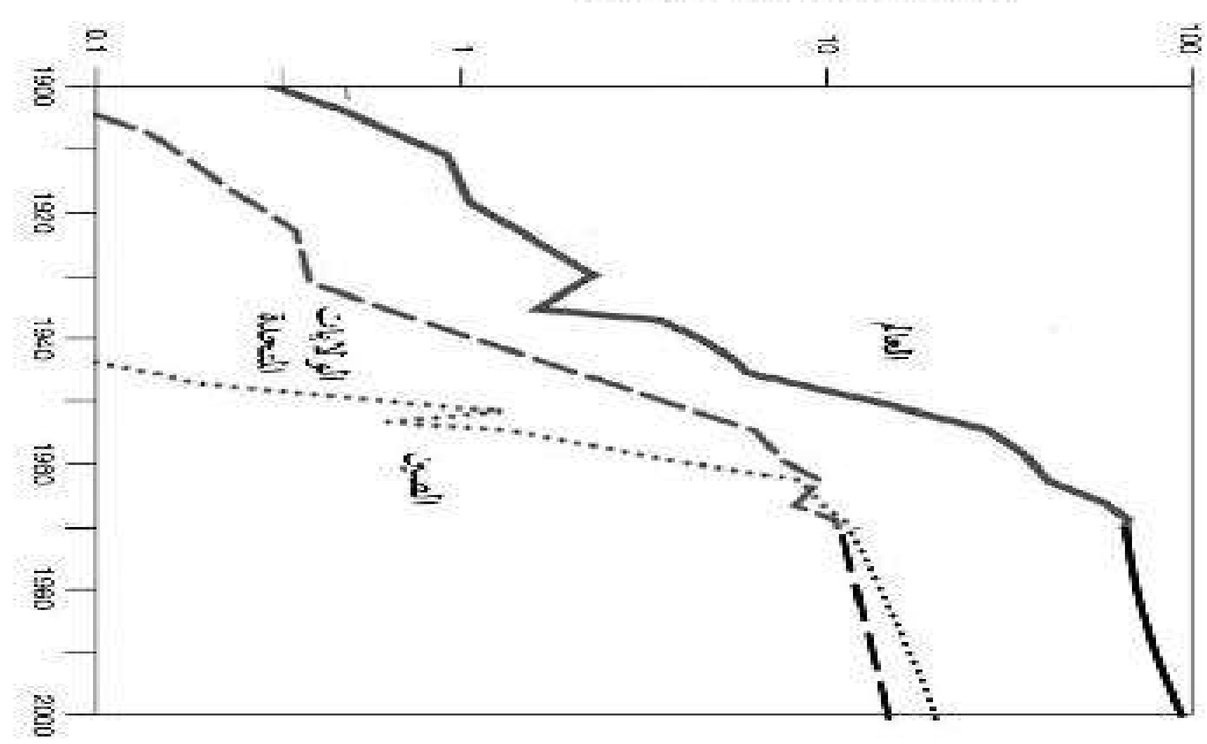
سجل متوسط الأداء نحو 35 جيغا جول/طن عام 2015، أما النسبة الأخيرة فتوافق قرابة 43 جيغا جول/طن آزوت. إلا أن جلّ المزارعين لا يستخدمون الأمونيا (بالحالة الغازية ضمن الضغط الطبيعي)، حيث يفضلون المواد السائلة أو الصلبة، وبخاصة اليوريا، ذات النسبة الأعلى من النيتروجين (45%) بين المركبات الصلبة التي يسهل استخدامها حتى في الحقول صغيرة المساحة. وإن عملية تحويل الأمونيا إلى يوريا وتغليف المنتج ونقله يكلف من الطاقة الإجمالية 55 جيغا جول/طن نيتروجين. وإن استخدام هذه النسبة كمعدل عالمي يعني أنه في عام 2015 الذي استخدم فيه نحو 115 ميغا طن نيتروجين في الزراعة، تطلب تركيب الأسمدة النيتروجينية من الطاقة قرابة 6.3 إكسا جول، أو أعلى بقليل من 1% من الإمداد العالمي بالطاقة (سميل 2014ب).

ولو تناولنا المسألة بطريقة عكسية، لوجدنا أنه من دون تركيبة هابر- بوش سينخفض عدد سكان العالم الذين يتمتعون بوجباتهم الغذائية اليوم بنحو 40%. ويمكن للأمم الغربية، التي تستخدم ما

تنتجه من حبوب كأعلاف، أن تخفض من اعتمادها على النيتروجين المركب من خلال خفض استهلاكها المرتفع من اللحوم. أما خيارات البلدان منخفضة الدخل والمكتظة السكان فتبقى محدودة. ولعل المثال الأبرز في هذا المقام أن النيتروجين المركب يوفر نحو 70% من كامل احتياجات النيتروجين في الصين. ومع حصول البلد على أكثر من 70% من بروتينه عن طريق المحاصيل، نجد أن قرابة نصف إجمالي النيتروجين في أغذية الصين تأتي من أسمدة تركيبية، حيث سيهوي متوسط كمية الوجبات في غياب تلك الأسمدة إلى مستوى أشبه بالمجاعة - أو بعبارة أخرى، إن الكمية المتوافرة في الوقت الراهن من الأغذية المخصصة للفرد يمكن إيصالها فقط إلى نصف سكان العالم في يومنا.

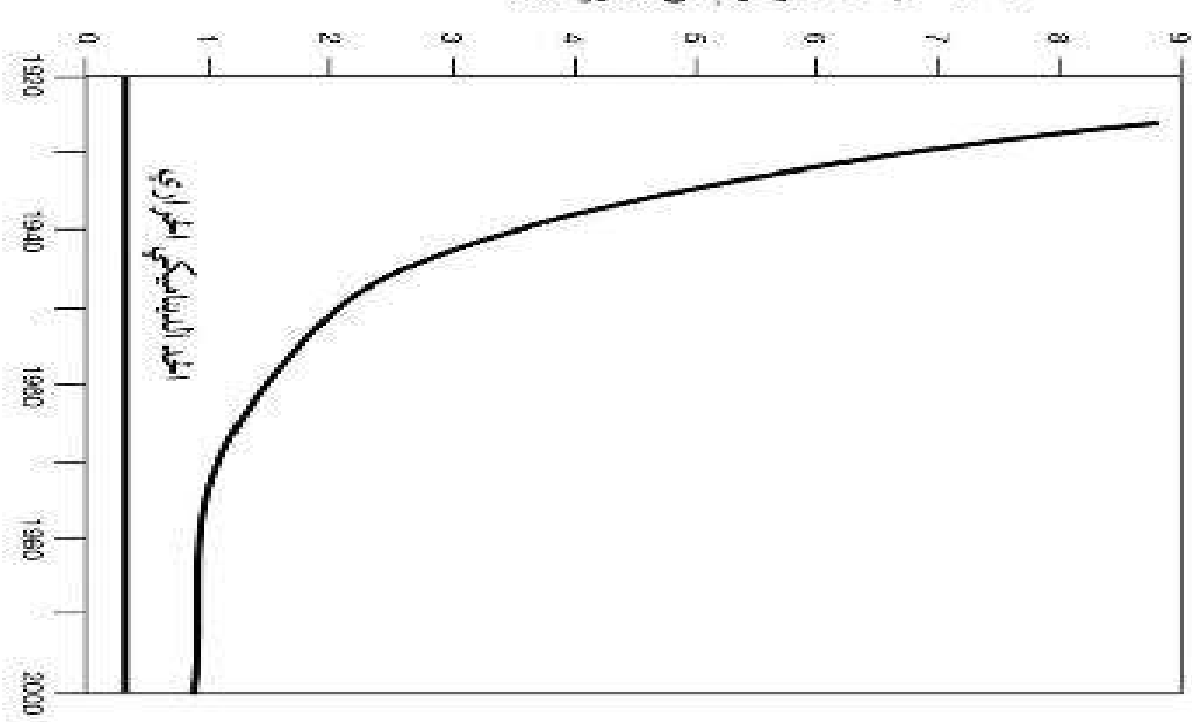
إن استخراج البوتاس (10 جيغا جول/طن بوتاسيوم) والفوسفات وصناعة أسمدة فوسفاتية (التي تعطي مجتمعة 20 جيغا جول/طن من الفوسفات) سيضيف 10% أخرى إلى المجموع. أما إجمالي تكلفة الطاقة اللازمة لإنتاج أسمدة كيميائية زراعية أخرى فتبقى أدنى بأشواط. ترافق نمو استخدام الأسمدة في أعقاب الحرب العالمية الثانية مع إدخال واتساع نطاق استخدام مبيدات الأعشاب ومبيدات الآفات والمواد الكيميائية التي تحد من نمو الأعشاب والحشرات والأمراض الفطرية التي تصيب المحاصيل. وكان أول مبيد أعشاب تجاري جرى تسويقه عام 1945 هو





تكلفة الطاقة اللازمة لتركيب الأمونيا

(ما يعادلها بالكيلوغرام من النيتروجين)



الشكل 6-6

تحققت زيادة أسية في إنتاج العالم من أسمدة النيتروجين (إلى اليسار) صاحبها تراجع غير عادي في تكاليف الطاقة لإنتاج مركبات الأمونيا (إلى اليمين). مقتبسة من معلومات في سميل (2001، 2015ب) ومنظمة الأغذية العالمية (2015أ).

D-2.4، حيث قتل الكثير من النباتات عريضة الأوراق من دون إلحاق ضرر خطير بالمحاصيل. أما أول مبيد حشري فكان DDT الذي اعتمد عام 1944 (فريدمان 1992). ويحتوي المخزون العالمي من مبيدات الأعشاب ومبيدات الآفات اليوم على آلاف المركبات التي يستخلص معظمها من مواد تغذية بتروكيميائية، حيث تتطلب تركيباتها النوعية كماً أكبر من الطاقة قياساً بإنتاج الأمونيا (بشكل عام >100 جيغا جول/طن، وبعضها يحتاج إلى أكثر من 200 جيغا جول/طن بكثير)، إلا أن الكميات المستخدمة في الهكتار تبقى أدنى بقيم أسية.

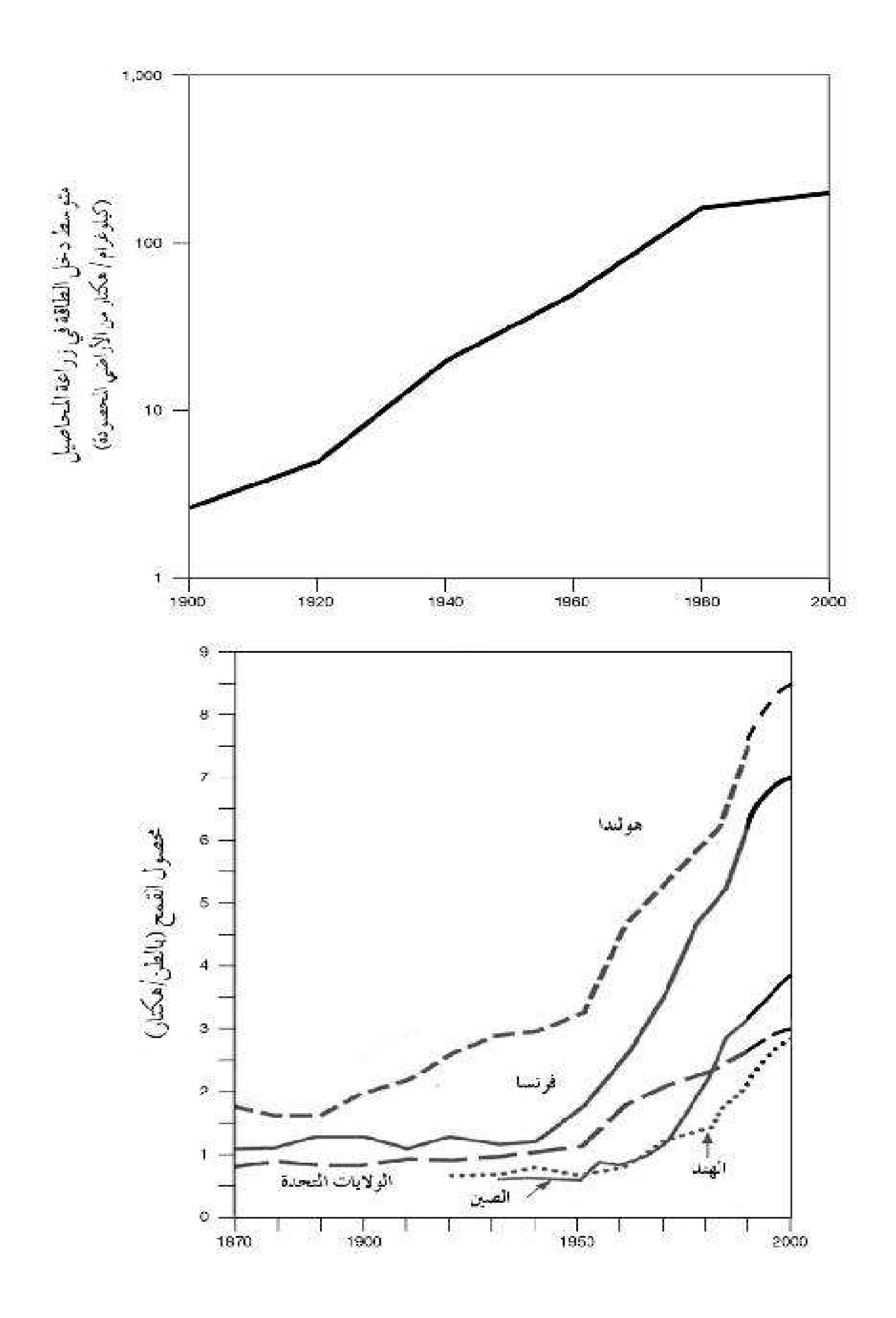
خلال القرن العشرين اتسعت مساحة الأراضي الزراعية المروية بنحو خمسة أضعاف على مستوى العالم، وذلك من أقل من 50 ميغا هكتار إلى ما يزيد على 250 ميغا هكتار، لتصل إلى نحو 275 ميغا هكتار بحلول عام 2015 (منظمة الأغذية والزراعة 2015أ)، وهذا يعني وفق القيمة الاسمية أن نحو 18% من الأراضي المزروعة المخصصة للمحاصيل هي من النوع المروي، حيث يروى قرابة نصفها من مياه الآبار بعد ضخها، لتصل نسبة الأراضي المروية في آسيا إلى زهاء 70% من إجمالي مساحة الأراضي. وبينما يتم استخراج مياه الري من أحواض المياه الجوفية، نجد أن تكلفة الطاقة المستخدمة للضخ (معظمها عن طريق محركات الديزل أو مضخات كهربائية) تشكل النسبة الأكبر من إجمالي تكلفة الطاقة (المباشرة وغير المباشرة) المخصصة لزراعة المحاصيل. إذ لا يزال الري الطريقة الشائعة لإيصال المياه بعد استخراجها إلى خطوط الفلاحة، لكن الري بالرشاشات المكلف والكفء (وبالأخص الري المحوري) ما زال يستخدم في كثير من البلدان (فوكايدس Phocaides أ2007).

يمكن إجراء الحسابات بطريقة تقريبية فقط لتتبع زيادة الاستخدام المباشر وغير المباشر للوقود الأحفوري والكهرباء في الزراعة الحديثة. ففي القرن العشرين، الذي سجل فيه عدد سكان العالم زيادة بمقدار 3.7 أضعاف واتسعت المساحة المزروعة بنحو 40%، شهدت أوجه دعم الطاقة التي تعتمد على النشاط البشري ارتفاعاً من مجرد 0.1 إكسا جول تقريباً إلى نحو 13 إكسا جول. ونتيجة ذلك، تلقت مساحة هكتار واحد مزروع بالمحاصيل عام 2000 دعماً بالطاقة زاد عن نظيره في عام 1900 بنحو 90 ضعفاً (الشكل 6-7). أو، بعيداً عن لغة الأرقام، يمكننا أن نضم صوتنا إلى صوت هوارد أودوم Howard Odum أ(1971، 115-116) في قوله:

اعتقد جيل كامل من المواطنين أن الطاقة الاستيعابية للأرض تتناسب مع مساحة الأرض المزروعة، وأن رفع مستوى الكفاءات باستخدام الطاقة الشمسية بات ممكناً. إلا أن ذلك لم يتعد كونه وهماً يبعث على الحزن، فرجل الصناعة لم يعد يتناول البطاطا التي نمت بالطاقة الشمسية، بل بات يأكل البطاطا التي صنعت جزئياً من النفط.

لكن هذا التحول تسبب في تغيرات طالت توافر الأغذية على الساحة العالمية بأساليب عدة. ففي عام 1900 ازداد إجمالي الإنتاج العالمي من المحاصيل (قبل الخسائر الناجمة عن التخزين والتوزيع) بهامش محدود فوق معدل احتياجات الإنسان من الأغذية، ما يعني أن نسبة كبيرة من الناس بالكاد حصلت على كمية من الأغذية قد تكفيها وقد لا تكفيها، في حين كانت نسبة الحصاد التي يمكن استخدامها كعلف للحيوانات في حدودها الدنيا. أما الدعم المخصص للطاقة والذي ازداد بشكل كبير فقد أتاح وصول أصناف مزروعة جديدة لمحاصيل أساس (كالذرة المهجنة، التي أدخلت خلال ثلاثينيات القرن الماضي، وأصناف القمح والأرز قصيرة الساق، التي اعتمدت أول مرة خلال ستينيات القرن المنصرم) إلى كامل إمكانيتها، ما أدى إلى زيادة غلال المحاصيل الأساس كافة، فضلاً عن زيادة إجمالية في الطاقة التي توافرها المحاصيل الغذائية المحصودة بنحو ستة أضعاف (سميل 2000ب، 2008).

في مطلع القرن الحادي والعشرين، زود الحصاد العالمي بإمداد يومي بلغ معدله (للسكان الذين وصل عددهم إلى نحو أربعة أضعاف نظيره عام 1900) نحو 2.800


متوسط دخل الطاقة في زراعة المحاصيل
(كيلوغرام/ هكتار من الأراضي المحصودة)
1,000
100
10
1
1900
1920
1940
1960
1980
2000
محصول القمح (بالطن/هكتار)
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
هولندا
فرنسا
الولايات المتحدة
الصين
الهند
1870
1900
1950
2000

الشكل 7-6

إجمالي أوجه الدعم (المباشرة وغير المباشرة) المخصصة للطاقة المستخدمة في الزراعة الحديثة (الصورة العلوية)، وإجمالي الحصاد وارتفاع غلال القمح (الصورة السفلية). المخطط مقتبس من بيانات سميل (2008ب)، بالجرايف مكميلان (2013) ومنظمة الأغذية والزراعة (2015أ).

كيلو كالوري/الفرد، وهي كمية أكثر من كافية إن تحققت عدالة الوصول إليها (سميل 2008أ). أما نسبة 12% من سكان العالم التي لا تزال تعيش نقص التغذية، فليس لديها ما يكفي من الطعام بسبب محدودية وصول هذه الشريحة من الناس إلى الغذاء، وليس لعدم توافره، أما نسبة الإمداد بالأغذية في البلدان التي تعيش حالة من الرخاء فتزيد بنحو 75% عن الحاجة الفعلية، ما يؤدي إلى إسراف هائل في الطعام (30-40% من أنواع الأغذية كافة على مستوى البيع بالتجزئة) وزيادة الوزن والسمنة (سميل 2013أ). إضافة إلى ذلك، يتم تقديم كمية كبيرة من الحبوب (50-60% في بلدان الرخاء) للحيوانات المستأنسة كعلف. ويعتبر الدجاج الحيوان الأكفأ في تحويل العلف (نحو ثلاث وحدات من العلف المركّز مقابل وحدة لحم)، أما نسبة العلف إلى اللحم في لحم الخنزير فتبلغ قرابة 9، في حين يبقى إنتاج لحم الأبقار من أعلاف حبية الأكثر احتياجاً، إذ يحتاج إلى 25 وحدة علفية مقابل وحدة واحدة من اللحم.

ولعل هذه النسبة المتدنية تمثل أيضاً دالة نسبة اللحم إلى الوزن الحي: فبالنسبة إلى الدجاج تكون النسبة مرتفعة إذ تصل حتى 0.65 وتبلغ عند الخنزير 0.53، بينما تنخفض للأبقار الكبيرة إلى 0.38 (سميل 2013د). إلا أن فاقد الطاقة اللازمة لإنتاج اللحوم (والألبان) يقابله مردود تغذوي: إذ إن ارتفاع استهلاك الأغذية الحيوانية قد جاء بوجبات غنية بالبروتين إلى الأمم الغنية كافة (ويتضح هذا بالقامات الأطول) وضمن -وسطياً- الحصول على تغذية كافية في معظم البلدان الفقيرة المكتظة بالسكان على مستوى العالم. أما الجانب الأبرز فهو وصول محتوى الطاقة في الوجبة الغذائية المتوسطة للفرد في الصين إلى نحو 3.000 كيلو كالوري/اليوم، أي أعلى بنسبة 10% من المتوسط الياباني (منظمة الأغذية والزراعة 2015أ).

التحول الصناعي

من المكونات الجوهرية لعملية التحول الصناعي وجود عدد كبير من التغيرات المترابطة (بلمر 1990)، حيث ينطبق ذلك على كل مقياس من مقاييس هذه العملية الآخذة بالانتشار. ولعل أهم التغيرات التي شهدتها المصانع إدخال المحركات الكهربائية التي تمد الآلات بالطاقة وتتيح التحكم

الدقيق والمستقل من خلال إقصاء أجيال من أدوات التحكم المركزية التي تنقل طاقة المحركات البخارية عن طريق سير جلدي ومحاور خطية. ولو لا توافر الأدوات عالية السرعة والفولاذ بنوعية أفضل لإنتاج آلات ومكونات نهائية متفوقة لبقي تأثير هذا التحول الجوهري محدوداً. وكما أشرنا للتو، فإنه لولا توافر وسائط تحريك أساسية جبارة جديدة، لما أبصر تكثيف التجارة الدولية النور؛ إلا أن تطورها بدوره لم يعتمد على التطورات في التصميم التقني للآلات فحسب، بل على كم كبير من أنواع الوقود السائل الجديدة التي يتم التزويد بها، وأنواع الوقود الناتجة عن عملية استخراج النفط الخام وما يتبعها من عمليات تكرير معقدة له.

وبالمثل، تطلب ارتفاع نسبة الإنتاج الآلي الذي تركز في المصانع الخاضعة لسيطرة هرمية تموضع العاملين بالقرب من هذه المؤسسات (بالتالي استدعى شكلاً جديداً من التحضر) إلى جانب تطوير مهارات ومهن جديدة (ما يعني اتساع غير مسبوق في التدريب المهني والتعليم الفني). وأدى استخدام اقتصاد المال وحركة العمالة ورأس المال إلى تأسيس علاقات قائمة على عقود مبرمة، ما تسبب في دعم نمو الهجرة والتداولات المصرفية. أما المساعي إلى الإنتاج بكميات كبيرة والتكاليف المتدنية للوحدة فقد أوجدت أسواقاً جديدة ضخمة اعتمد عملها تبعاً للتوقعات على موثوقية النقل والتوزيع بتكاليف مقبولة.

وخلافاً للاعتقاد الشائع، لم يكن ارتفاع مستوى توافر الحرارة الناجمة عن الفحم والطاقة الميكانيكية التي تولدها المحركات البخارية ضرورياً لإطلاق هذه التغيرات المعقدة نحو التحول الصناعي. فالتصنيع داخل المنازل والورشات، اعتماداً على عمالة ريفية رخيصة وخدمة أسواق وطنية وحتى دولية، استمر لأجيال عدة قبل البدء بالتحول الصناعي اعتماداً على طاقة الفحم (ميندليز 1972؛ كلاركسون 1985؛ هودسون 1990). ولعل هذه الانطلاقة نحو التحول الصناعي لم تقتصر على أجزاء من أوروبا فحسب (ألستر Ulster، كوتسولدس the Cotswolds، بيكاردي Picardy، ويستفاليا Westphalia، ساكسوني Saxony، سيليسيا Silesia، وكثير غيرها)، إذ ظهر إنتاج حرفي ضخم مُعدّ للأسواق المحلية وأسواق التصدير في عهد اسرتيْ مينغ وتشينغ بالصين، وكذلك في عهد توكوغاوا باليابان، وبقاع من الهند.

أما المثال الملحوظ فكان في كربنة الحديد المطاوع لإنتاج الفولاذ الهندي wootz الذي تمخضت أشهر عمليات تحويله عن صناعة السيوف الدمشقية (موشيت 1803؛ إيجيرتون 1896؛ فويرباخ 2006)، حيث أنتج على نطاق صناعي تقريباً في بعض مناطق الهند (لاهور وأمريتسار وأجار وجيابور وميسور ومالابار وجولكوندا) بغرض تصديره إلى بلاد الفرس والإمبراطورية العثمانية. وأما تصنيع النسيج بطريقة شبه آلية على نطاق واسع نسبياً اعتماداً على طاقة المياه فكان الخطوة التالية في التحول الأوروبي من الإنتاج المنزلي نحو التصنيع المركزي. وفي عدد من المواقع، نجحت النواعير والعنفات الصناعية في منافسة المحركات البخارية لعقود بعد إدخال وساطة التحريك الأولي غير الحية الجديدة.

لم يكن الاستهلاك بكميات كبيرة اتجاهاً جديداً هو الآخر. فنحن نميل إلى الاعتقاد بأن المادية جاءت نتيجة التحول الصناعي، لكن في بقاع من أوروبا الغربية، لاسيما في هولندا وفرنسا، كانت بمثابة قوة اجتماعية رئيسة خلال القرنين الخامس عشر والسادس عشر (موكيرجي Mukerji أ1981؛

روشة Roche أ2000). وبالمثل في عهد توكوغاوا باليابان (1603-1868)، بدأ سكان المدن الغنية، وبخاصة سكان إيدو، عاصمة البلاد، ينعمون بالتحولات التي تراوحت من شراء الكتب المصورة (إيهون ehon) إلى تناول الطعام خارج المنزل (من هنا باتت وجبة السوشي شائعة)، وحضور العروض المسرحية، وكذلك جمع المطبوعات الملونة (ukiyoe) للمناظر الطبيعية والممثلين (شيلدون Sheldon أ1958؛ نيشياما Nishiyama وجرومر Groemer أ1997). أما أذواق العدد المتزايد من الأثرياء وتطلعاتهم فكانت باعثاً على توفير دعم ثقافي مهم للتحول الصناعي، حيث سعوا لشراء سلع تراوحت بين تشكيلة أواني الطبخ البسيطة إلى بهارات مستوردة ومنسوجات ناعمة، وبين خرائط منقوشة ساحرة وأطقم شاي رفيعة المستوى.

وبقدر ما مصطلح «الثورة الصناعية» جذاب وعميق الجذور بقدر ما هو مضلل. فقد كانت عملية التحول الصناعي بمثابة تطورات تدريجية ومتفاوتة في أغلب الأحيان. وانطبق ذلك على المناطق التي تحولت تحولاً سريعاً من التصنيع المحلي إلى إنتاج مركز على نطاق واسع لمصلحة أسواق بعيدة. ولعل زيف التوقيت الدقيق لهذه التغيرات (روستو Rostow أ1965) يتجاهل تعقيد العملية برمتها وطبيعتها الثورية بحق. فبداياتها الإنجليزية يجب أن تعود إلى أواخر القرن السادس عشر على أقل تقدير، إلا أن التطور بهيئته الكاملة في بريطانيا لم يبصر النور إلا قبل 1850 (كلابام Clapham أ1926؛ آشتون Ashton أ1948). وحتى خلال تلك الفترة، كان عدد الحرفيين التقليديين يفوق بأشواط عدد نظرائهم من عمال المصانع المسؤولين عن تشغيل الآلات، إذ أظهر إحصاء عام 1851 أن عدد صناع الأحذية في المملكة المتحدة لا يزال يفوق عدد العاملين في مناجم الفحم، وأن عدد الحدادين يبقى أعلى من عدد العاملين في صناعة الحديد (كاميرون Cameron أ1985).

لم تكن رؤية عملية التحول الصناعي حول العالم برمتها كمحاكاة للتطورات الإنجليزية أقل تضليلاً أيضاً (لانديس Landes أ1969). فحتى بلجيكا، التي كانت التطورات التي شهدتها أشبه بحالات التقدم البريطاني، اتبعت طريقاً مميزاً. إذ انصب تركيزها على صناعة التعدين أكثر من تركيزها على النسيج. أما الخصوصيات الوطنية الجوهرية فقد أسفرت عن أنماط متجانسة من التحول الصناعي. إذ اشتملت على تركيز فرنسي على الطاقة المائية، واعتماد طويل الأجل لأمريكا وروسيا على الخشب، بينما انصب التقليد الياباني على الحرف اليدوية الدقيقة. لم يكن الفحم والبخار من مستلزمات ثورة التحول الصناعي في البداية. لكنهما شرعا تدريجياً بتوفير الطاقة الحرارية والميكانيكية بمستويات غير مسبوقة وبدرجة عظيمة من الموثوقية، ليتسع إثر ذلك نطاق التحول الصناعي ويزداد سرعة في آن واحد، ما يعني في نهاية المطاف استهلاك أكبر لأنواع الطاقة الأحفورية.

صحيح أن استخراج الفحم لم يكن ضرورياً لتوسيع الصناعة بيد أنه كان حاسماً بالتأكيد لتسريعها. ولعل مقارنة بين بلجيكا وهولندا توضح هذا التأثير. فالمجتمع الهولندي المغرق في التحضر كان مجهزاً بمستوى شحن ممتاز وقدرات تجارية ومالية متقدمة، لكنه بقي وراء بلجيكا الغنية بالفحم، مع أنها أفقر، لتصبح البلد الصناعي الأكبر على مستوى قارة أوروبا خلال منتصف القرن التاسع عشر (موكير Mokyr أ1976). ومن المناطق الأوروبية الأخرى التي شهد فيها الاقتصاد القائم

على الفحم انطلاقاً مبكراً منطقة راين-رور وبوهيميا ومورافيا في إمبراطورية هابسبورغ، وكذلك في سيليسيا البروسية والنمساوية.

وتكرر هذا النمط خارج أوروبا الغربية والوسطى. ففي الولايات المتحدة، احتلت بنسلفانيا التي اشتُهرت بفحم الأنتراسيت عالي النوعية، وأوهايو، التي عرفت بفحم البيتومين الممتاز، مكانة الطليعة (إيفنسون 1942). وفي روسيا قبل الحرب العالمية الأولى، كان اكتشاف الرواسب الغنية من فحم الدونتس في أوكرانيا وتطوير حقول النفط في باكو خلال سبعينيات القرن التاسع عشر بمثابة توجيه للتوسع الصناعي السريع لاحقاً (فالكوس 1972). أما سعي اليابان نحو الحداثة إبان عهد ميجي فقد اعتمد على طاقة الفحم المستخرج من شمالي كيوشو. وقد بدأت أول منشأة متكاملة حديثة للحديد والفولاذ بالإنتاج بعد 48 عاماً من انفتاح البلد على العالم، عام 1901، وذلك مع تشغيل فرن الصهر رقم 1 هيجاشيدا داخل مصنع فولاذ ياواتا (سلف مصنع نيبون للفولاذ) في شمال كيوشو (يونيكورا Yonekura أ1994). أما أكبر إمبراطورية تجارية هندية فتطورت من فرن ج. تاتا للصهر باستخدام فحم بيهاري في جامشيدبور في مطلع عام 1911 (فولاذ تاتا 2011).

ومع توافر الإمداد بطاقة الفحم والبخار، بات بإمكان المصنعين التقليديين تحويل كم أكبر من المنتجات الجيدة والرخيصة حيث كان هذا الإنجاز شرطاً مسبقاً ضرورياً للاستهلاك بكميات كبيرة. فتوافر إمداد موثوق معتدل التكلفة من الطاقة الميكانيكية أتاح تزايد الاعتماد على الآلات المعقدة. وهذا بدوره قاد إلى تصاميم معقدة واختصاص أكبر في تصنيع القطع والأدوات والآلات. وجهزت الصناعات الجديدة التي تعمل بطاقة الفحم والكوك والبخار لإمداد الأسواق الوطنية والدولية بسرعة غير مسبوقة. وبدأ تصنيع المراجل والأنابيب التي تتحمل ضغطاً عالياً بعد عام 1810. وارتفع إنتاج قضبان السكك الحديدية والقاطرات والعربات بشكل سريع عقب 1830، وكذلك الأمر بالنسبة للعنفات المائية والمراوح اللولبية بعد عام 1840. ووجدت الهياكل الحديدية وكابلات التلغراف الممتدة تحت البحر سوقاً كبيراً لها بعد عام 1850، كما تمكنت الطرائق التجارية لصناعة الفولاذ غير المكلف - أولاً في محولات بيسيمر بعد عام 1856، ولاحقاً في أفران مفتوحة (سيمنز-مارتن Siemens-Martin) خلال ستينيات القرن التاسع عشر (بيسيمر Bessemer أ1905؛ سميل 2016) من إيجاد أسواق جديدة واسعة للمنتجات النهائية التي تتراوح بين أدوات المطبخ وقضبان الحديد، وبين المحاريث وجسور الإنشاءات.

إن ارتفاع مدخلات الوقود واستبدال الآلات بالأدوات أدى إلى الحدّ من استخدام الطاقة العضلية للإنسان لتصبح مصدراً هامشياً للطاقة. وتحولت العمالة بشكل مطرد نحو دعم العملية الإنتاجية وضبطها وإدارتها، حيث يتضح هذا الاتجاه جيداً من خلال تحليل الإحصاءات في إنجلترا وايلز ومسح القوى العاملة على مدى قرن ونصف قرن (ستيوارت Stewart، دي De، كول Cole أ2015). ففي عام 1871، اعتمد نحو 24% من العاملين على أعمال «الطاقة العضلية» (في الزراعة والإنشاءات والصناعة)، ولم يكن يعمل في مهن «الرعاية» (في ميدان الصحة والتعليم ورعاية الأولاد والتدبير المنزلي والرفاه) سوى 1% فقط، لكن في عام 2011 وصلت أعمال الرعاية إلى 12% بينما تراجعت نسبة الأعمال العضلية إلى 8% فقط من القوى العاملة، حيث

بات الكثير من الأعمال العضلية اليوم، كخدمات التنظيف والأعمال المنزلية والأعمال الرتيبة على امتداد خطوط الإنتاج في المصانع، مهام آلية.

لكن حتى مع تراجع أهمية العمالة البشرية، أظهرت الدراسات الجديدة المنتظمة على مهام الأفراد والعمليات الكاملة في المصانع إمكانية تحقيق زيادة كبيرة في إنتاجية العمل من خلال تحسين الأنشطة العضلية وإعادة ترتيبها وتحديد مقاييسها. وكان فريدريك وينسلو تايلور Winslow Taylor أ(1856-1915) رائداً في هذه الدراسات إذ بدأ عام 1880 وأمضى 26 عاماً في تحديد حجم المتغيرات الرئيسة كافة الداخلة في قطع الفولاذ، واختزل نتائجه في مجموعة بسيطة من الحسابات على مسطرة حسابية، وتوصل إلى استنتاجات عامة لإدارة الكفاءة دوّنها في كتابه «مبادئ الإدارة العلمية *The Principles of Scientific Management*» (تايلور Taylor أ1911)؛ حيث لا تزال دروسه بعد قرن من الزمن دليلاً توجيهياً لبعض من أنجح صانعي المنتجات الاستهلاكية في العالم (المربع 6-3).

تمثلت فترة التحول الجذري الجديد التي شهدتها عملية التحول الصناعي في إقصاء المحركات البخارية لمصلحة المحركات الكهربائية. فالكهرباء شكل متفوق من أشكال الطاقة، وليس قياساً بالطاقة البخارية وحسب. فالحصول على الكهرباء وحدها يجمع بين السرعة واليسر، مع قدرتها على خدمة كل قطاع استهلاكي بموثوقية كبيرة باستثناء الطيران. فضغطة واحدة على مفتاح التشغيل تحول هذه الكهرباء إلى ضوء أو حرارة أو حركة أو قدرة كيميائية. إذ إن تدفقها الذي يتسم بسهولة تعديله يتيح التحكم بدقتها وسرعتها وبالعملية كلها على نحو لم يكن مستداماً مسبقاً. أضف إلى ذلك أنها طاقة نظيفة وهادئة عند نقطة الاستهلاك. فإذا مدت الأسلاك المناسبة، صارت الكهرباء قادرة على توفير عدد لا نهاية له تقريباً من الاستخدامات المتزايدة أو المتغيرة، مع أنها لا تتطلب أي تخزين.

لا شك في أن هذه الصفات جعلت من اعتماد الكهرباء في الصناعة تحولاً ثورياً حقيقياً. فعلى أي حال، نجد أن المحركات البخارية التي حلت محل النواعير لم تغير من طريقة نقل الطاقة الميكانيكية التي تغذي شتى المهام الصناعية بالطاقة. وبالتالي فإن هذا البديل لم يحدث إلا تأثيراً طفيفاً على مستوى مخطط العمل العام. أما المساحة

المربع 6-3

من تجارب قطع الفولاذ إلى تصدير السيارات في اليابان

ارتبط القلق الرئيس الذي ساور فريدريك وينسلو تايلور بالعمالة الضائعة، بمعنى آخر، بعدم كفاءة استخدام الطاقة - «حيث لا تترك كل تلك التحركات المرهقة للرجال أو البعيدة عن الكفاءة أو الموجهة بشكل خاطئ أثراً مرئياً أو ملموساً خلفهم» - وتحدث عن تحسين المجهود الجسدي. أما نقاد تايلور فلم يجدوا في ذلك إلا طريقة مجهدة للاستغلال (كوبلي Copley أ1923؛ كانيجل

Kanigel أ1997)، إلا أن جهود تايلور استندت إلى فهم علم الطاقة الفعلي للعمل إذ عارض تخصيص حصص كبيرة (فإن أصيب «الرجل بتعب مفرط جراء عمله، عندها يكون ثمة خطأ في تنفيذ المهمة وهذا أبعد ما يكون عن موضوع الإدارة العلمية») وأكد أن المعرفة التي يراكمها المديرون تبقى «أدنى بأشواط من المعرفة المتراكمة لدى العمال الأدنى منهم ومن براعتهم»، وبالتالي، نادى «بتعاون الإدارة مع العمال من خلال علاقة وثيقة» (تايلور 1911، 115).

رفضت توصيات تايلور في البداية (وطرد من منشأة بيت لحم للفولاذ عام 1901)، إلا أن مبادئ الإدارة العلمية التي نادى بها باتت في آخر المطاف دليلاً أساسا لأعمال التصنيع على المستوى العالمي. وبصورة عامة، فإن النجاح العالمي للشركات اليابانية ارتكز على جهد متواصل للحد من العمالة التي تفتقر إلى الإنتاجية وكذلك من عبء العمل المفرط، واستبعاد وتيرة العمل غير المتناسقة، فضلاً عن تشجيع العمال على المشاركة في عملية الإنتاج من خلال تقديم اقتراحات بتحسينه، والحدّ من المواجهة بين العمال والإدارة. وما نظام الإنتاج الشهير لشركة تويوتا - الثلاثي المتجانس muda mura muri (الحد من الأنشطة التي لا تضيف القيمة، وانعدام تناسق وتيرة الإنتاج، وعبء العمل المفرط) - إلا تجسيداً لنظرية تايلور (أونو Ohno أ1988؛ سميل 2006).

تحت سقف المعمل فبقيت مكتظة بمحاور الخط الرئيس المربوطة بمحاور موازية تنقل الحركة بوساطة السيور الجلدية إلى آلات فردية (الشكل 6-8). فإذا ما توقف عمل أحد وسائط التحريك الأولية (سواء بسبب انخفاض مستوى المياه أو تعطل المحرك) أو تعطل النقل (سواء بسبب شرخ في محور الخط أو نتيجة انزلاق السير الناقل) تسبب في شل العملية الإنتاجية برمتها، ناهيك عن أن هذه الترتيبات تسببت في الكثير من خسائر الاحتكاك ولم تسمح إلا بتحكم محدود بالطاقة ضمن أماكن العمل.

عملت المحركات الكهربائية الأولى على تغذية محاور قصيرة لمجموعات قليلة من الآلات. لكن سريعاً ما باتت سواقات الوحدة هي الشائعة بعد عام 1900. وبين عامي 1899 و1929 ازداد إجمالي الطاقة الميكانيكية المركبة في الصناعة الأمريكية إلى نحو أربعة أضعاف، بينما زادت استطاعات المحركات الكهربائية الصناعية بنحو



الشكل 6-8

صورة لداخل ورشة الخراطة الرئيسة في مصنع ستوت بارك للوشائح في فينسوايت، لايكسايد، كومبيريا، تظهر التشكيلات النمطية للسيور العلوية التي تنقل الطاقة من محرك بخاري ضخم إلى آلات مختصة. أنتج هذا المعمل وشائح خشبية استخدمت في صناعات الغزل والنسيج في لانكاشير (Corbis).

60 ضعفاً لتصل إلى أكثر من 82% من إجمالي الطاقة المتوافرة، قياساً بأقل من 5% في نهاية القرن التاسع عشر (مكتب الإحصاء الأمريكي 1954؛ شور Schurr وآخرون، 1990). بعد ذلك طرأ تغير طفيف على نسبة إسهام الطاقة الكهربائية: فقد استكمل استبدال المحركات بالسواقات التي تعمل بالبخار والطاقة المائية المباشرة قبل ثلاثة عقود من بدء العملية مع أواخر تسعينيات القرن التاسع عشر. وإن الإمداد بالطاقة المخصصة للوحدة والذي اتسم بالكفاءة والثبات فعل ما هو

أكثر من مجرد إزالة الفوضى المتراكمة فوق رؤوسنا، وما يرتبط بتلك الفوضى من ضجيج ومخاطر الحوادث المرتبطة بها حتماً إذ سمحت إزالة سواقة المحور بتوفير مكان في الأسقف لتركيب أجهزة متفوقة للإنارة والتهوية، وأتاحت تصميم المنشأة على نحو يتوافق مع زيادة السعة بسهولة. وبالتالي، أفضى ارتفاع كفاءة المحركات الكهربائية، إلى جانب الضبط الدقيق والمرن للطاقة بشكل فردي ضمن محيط العمل إلى زيادة إنتاجيات العمل.

أدى اعتماد الكهرباء أيضاً إلى إطلاق صناعات مختصة على نطاق واسع. إذ جاء في البداية تصنيع المصابيح والمولدات وأسلاك نقل الكهرباء (بعد 1880) وكذلك العنفات البخارية والمائية (بعد 1890). وأدخلت مراجل الضغط العالي لحرق الوقود المسحوق داخلها بعد عام 1920؛ وبدأ إنشاء السدود الضخمة باستخدام كميات كبيرة من الإسمنت المسلح بعد عقد من الزمن. وانتشر تركيب أجهزة التحكم بتلوث الهواء بعد 1950، بينما طلب تنفيذ أولى محطات الطاقة النووية قبل 1960. وأدى ارتفاع الطلب على الكهرباء أيضاً إلى تحفيز الاستكشافات الجغرافية المادية واستخراج النفط والنقل. أما البحوث الأساسية التي أجريت على نطاق واسع في ميدان خصائص المادة وهندسة التحكم والأتمتة فكانت ضرورية أيضاً لإنتاج أنواع أفضل من الفولاذ، وغيره من المعادن، وخلائطها وزيادة موثوقية التجهيزات المركبة وعمرها وهي تجهيزات باهظة التكاليف تستعمل في استخراج مصادر الطاقة ونقلها وتحويلها.

لقد أدى توافر الكهرباء الموثوقة والرخيصة إلى تحول فعلي طال كل نشاط صناعي. ولعل أهم تأثير على الإطلاق في الصناعة كان اعتماد خطوط التجميع على نطاق واسع (نية 2013). فالتنوع الكلاسيكي، الذي بات قديماً اليوم، لطرز فورد الصارمة اعتمد على السير الناقل الذي أدخل عام 1913. أما النوع الياباني الحديث الذي يتسم بالمرونة فيعتمد على تسليم للقطع في الوقت المناسب وعلى العمال القادرين على تنفيذ عدد من المهام المختلفة. ويجمع النظام، الذي أدخل في مصانع تويوتا، بين عناصر الممارسات الأمريكية والنُهُج المحلية والأفكار الأصلية (فوجيموتو Fujimoto أ1999). واستند نظام إنتاج تويوتا (*kaizen*) إلى تحسين متواصل للإنتاج وتكريس أفضل مستويات ضبط الجودة التي يمكن الوصول إليها دائماً. مرة أخرى، يبقى الجانب الرئيس المشترك لهذه الأعمال كافة متمثلاً في تخفيض فاقد الطاقة إلى الحدّ الأدنى.

أدى توافر الكهرباء غير باهظة التكاليف إلى ظهور صناعات جديدة مثل إنتاج المعادن والصناعات الكهركيميائية. إذ أتاحت الكهرباء صهر الألمنيوم على نطاق واسع من خلال اختزال أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) بالتحليل الكهربائي المنحل بمحلول الاستقطاب، وبخاصة ألومينيات الصوديوم الفلورية (Na_3AlF_6). وقد باتت الكهرباء منذ ثلاثينيات القرن الماضي طاقة لا يمكن الاستغناء عنها في تركيب أنواع متزايدة من البلاستيك وتشكيلها، فضلاً عن إدخال مواد مركبة مؤخراً، وعلى رأسها جميع أنواع ألياف الكربون. أما تكاليف الطاقة اللازمة لإنتاج هذه المواد فترتفع بنحو ثلاثة أضعاف عن تكاليف إنتاج الألمنيوم، حيث بات استخدامها التجاري على أوسع نطاق يحل محل خلائط الألمنيوم في صناعة الطائرات التجارية: إذ يبلغ حجم المواد المركبة في أحدث طرازات بوينغ 787 نحو 80%.

صحيح أن المواد الجديدة الخفيفة حلت محل الفولاذ، إلا أن صناعة الفولاذ بحد ذاتها يدخل فيها استخدام أفران القوس الكهربائية بشكل متزايد يوماً تلو الآخر، حيث ظهرت استخدامات كثيرة لأنواع أخف وزناً من الفولاذ لكنه أقوى، لاسيما في صناعة السيارات (سميل 2016). وقبل إنهاء هذه القائمة، التي يمكن أن تستمر لصفحات، أجد لزاماً عليَّ التأكيد أنه لولا الكهرباء لما أمكن إنتاج القطع المخصصة لإنتاج الأجهزة الدقيقة على نطاق واسع، والتي تغلب عليها مستويات تسامح فائقة الدقة في تطبيقات واسعة الانتشار اليوم كالمحركات النفاثة أو أجهزة التشخيص الطبي، ولما استخدمت اليوم في جميع أنحاء العالم أجهزة التحكم الإلكتروني الدقيقة، ولا الحواسب التي باتت في كل مكان، ولا المليارات من أجهزة الاتصالات السلكية واللاسلكية المستعملة في شتى أنحاء العالم.

رغم التراجع المطرد الذي شهدته نسب التصنيع (كالنسبة المئوية للقوى العاملة أو إجمالي الناتج المحلي) في البلدان الغنية كافة من الناحية الافتراضية - حيث سجلت في مطلع عام 2015 نسبة أعلى بشكل طفيف من 10% للعمال وبلغت نحو 12% لإجمالي الناتج المحلي الأمريكي (وزارة العمل الأمريكية 2015) - إلا أن عملية التحول الصناعي تواصلت مع تغيرات طرأت على تشكيلها. وستبقى تدفقات الطاقة والمواد بقيم كبيرة عند مستوياتها الأساسية، كما تبقى المعادن المواد المثالية للصناعة في حين يستعيد الحديد سيطرته بين سائر المعادن، بعد أن دخل استخدامه اليوم في كثير من أنواع الفولاذ. وفي عام 2014 ارتفع إنتاج الفولاذ بنحو 20 ضعفاً عن كامل مجموعة إنتاج المعادن غير الحديدية: الألمنيوم والنحاس والزنك والرصاص (المسوحات الجيولوجية الأمريكية 2015). أما صهر فلزات الحديد في أفران الصهر، وما أعقبه من صناعة للفولاذ في أفران أكسجين أساسية، واستخدام الفولاذ المكرر في أفران القوس الكهربائية، فكان السمة المهيمنة على إنتاج الفولاذ. لا شك أن النمو الهائل الذي شهده إنتاج الفولاذ لم يكن ليبصر النور لولا توافر أفران الصهر ذات الحجم الأضخم والكفاءة الأعلى (المربع 6-4، الشكل 6-9).

وبالمثل، باتت تقنيات صناعة الفولاذ أكثر كفاءة، لا بسبب انخفاض استهلاك الطاقة وحسب، بل لارتفاع كمية المنتج (تاكاماتسو Takamatsu وآخرون 2014). فقد استطاعت محولات بيسيمر Bessemer الأولى تحويل أقل من 60% من الحديد

المربع 6-4

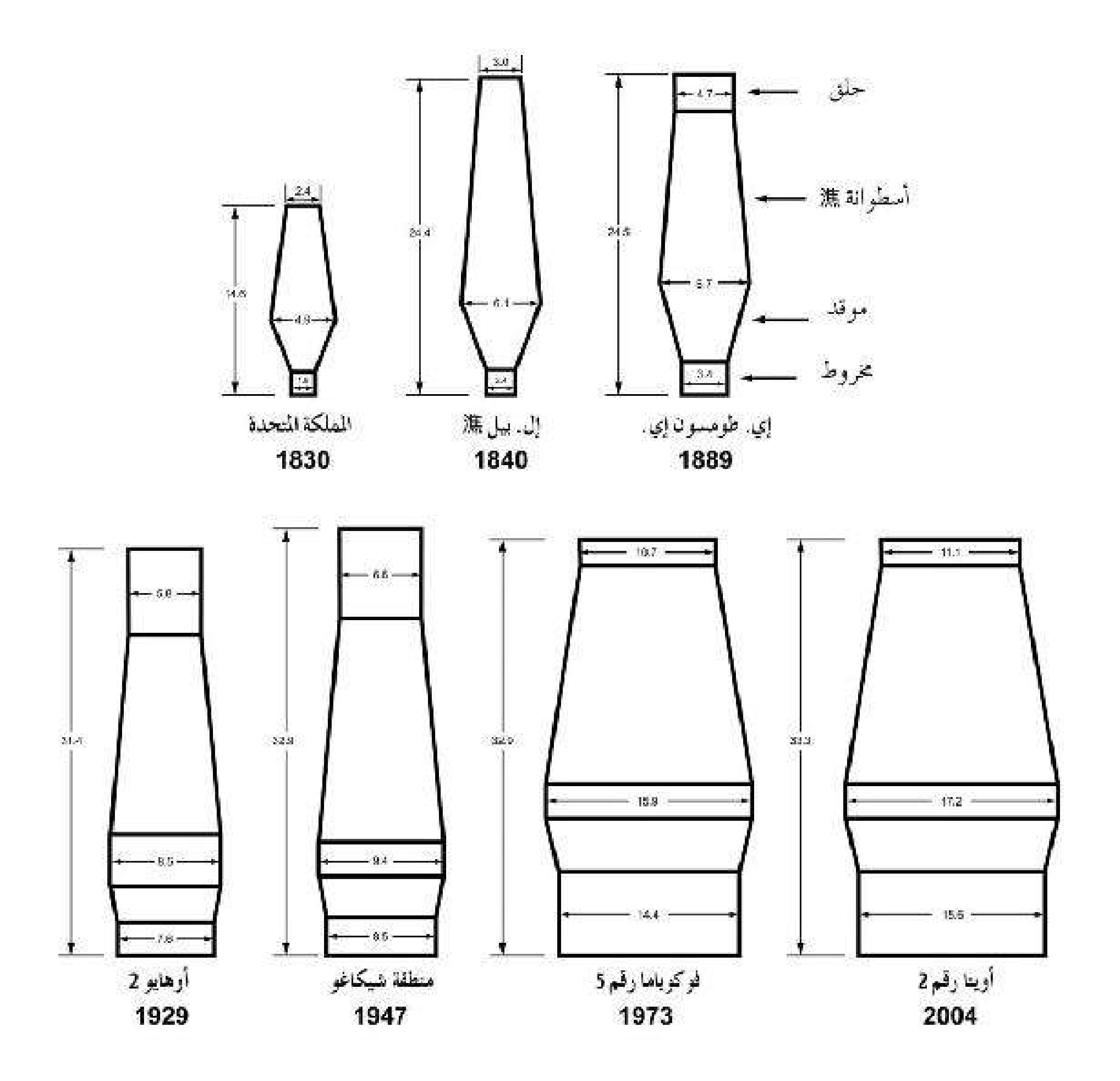
نمو أفران الصهر والتوازن بين كتلتها وطاقتها

قلة من البنى المخصصة للإنتاج التي تنسب إلى العصور الوسطى لا تزال تحتفظ بأهميتها بالنسبة إلى وظائف الحضارة الحديثة مثل أفران الصهر. وكنا قد أشرنا في الفصل الخامس إلى أن إعادة تصميم بل (Bell) لتلك الأفران عام 1840 أدى إلى زيادة حجمها الداخلي بنحو خمسة أضعاف، ليصل بذلك إلى 250 م^3. وبحلول عام 1880 تجاوز حجم أكبر الأفران 500 م^3، ليصل إلى 1.500 م^3 عام 1950، بينما في عام 2015 سجلت الأحجام أرقاماً قياسية تراوحت بين

5.500 و6.000 م^3 (سميل 2016). أما الزيادات التي كانت من نصيب الإنتاجية فقد أدت إلى رفع إنتاج المعدن الساخن من 50 طناً/اليوم عام 1840 إلى أكثر من 400 طن/اليوم بحلول عام 1900، كما سُجلت الكمية التي اقتربت من 1.000 طن/اليوم قبيل الحرب العالمية الثانية، ليبلغ إنتاج أكبر الأفران اليوم نحو 15.000 طن/اليوم، في حين وصلت الكمية القياسية التي أنتجها فرن بوهانج 4 لشركة صناعة الفولاذ في كوريا الجنوبية إلى نحو 17.000 طن/اليوم.

هنالك دفق هائل من الكتلة والطاقة المطلوبة لتشغيل أفران الصهر الضخمة وأفران الأكسجين المرتبطة بها (جيردس Geerdes وتوكسوبيوس Toxopeus وفان دير فليت Van der Vliet أ2009؛ سميل 2016). فإن كان أحد أفران الصهر ينتج يومياً 10.000 طن/اليوم من الحديد ويوفر الإمداد لفرن أكسجين أساسي مجاور، فهو بحاجة إلى 5.11 ميغا طن من الفلزات و2.92 ميغا طن من الفحم، وإلى 1.09 ميغا طن من مواد الصهيرة، ونحو 0.5 ميغا طن من خردة الفولاذ. وعليه، فإن مصنعاً ضخماً ومتكاملاً للفولاذ يتلقى كل عام 10 ميغا طن من المواد. واليوم تستمر الأفران الحديثة في إنتاج المعدن الساخن لمدة 15-20 عاماً قبل حاجتها إلى إعادة تبطين الآجر العاكس والموقد الكربوني داخلها. أما هذه المكاسب على صعيد الإنتاجية فقد ترافقت بتراجع استهلاك الكوك النوعي. إذ تراوحت الاحتياجات القياسية للكوك في عام 1900 بين 1-1.5 طن/طن من المعدن الساخن، بينما وصلت النسب على المستوى الوطني عام 2010 إلى نحو 370 كغ/طن في اليابان وأقل من 340 كغ/طن في ألمانيا (لونجن Lüngen أ2013). وعليه تراجعت تكلفة الطاقة اللازمة لصهر الحديد باستخدام وقود الكوك من نحو 275 جيغا جول/طن عام 1750 إلى 55 جيغا جول/طن عام 1900، وإلى قرابة 30 جيغا جول/طن عام 1950 وبين 12 و15 جيغا جول/طن عام 2010.

إلى فولاذ، لتزداد النسبة لاحقاً إلى أكثر من 70%. وتمكنت الأفران المفتوحة في نهاية المطاف من تحويل نحو 80%، لتشكل بذلك أفضل أفران الأكسجين الأساسية اليوم، والتي أدخلت أول مرة خلال خمسينيات القرن الفائت، ما يزيد على 95%، في حين تستطيع أفران القوس الكهربائية تحويل نسبة تصل حتى 97%. وتستهلك



الشكل 9-6

التغيرات التي طرأت على تصاميم أفران الصهر خلال الفترة من 1830-2004. واشتملت مناحي التغيرات الأساسية على زيادة في طول الأسطوانات وعرضها، مع مواقد أكبر، ومخاريط أشد انحداراً. واليوم ينتج أكبر الأفران ما يزيد على 15.000 طن من المعدن الساخن في اليوم. الصورة طبق الأصل لتلك الواردة في سميل (2016).

أفران القوس الكهربائية اليوم أقل من 350 ك واط سا / طن لكل ك واط سا/طن من الفولاذ قياساً بأكثر من 700 ك واط سا/طن عام 1950، يضاف إلى ذلك المكاسب التي اقترنت بتراجع نسب الانبعاثات: فبين 1960 و2010 تراجعت النسب الأمريكية (لكل طن من المعدن الساخن) بنسبة نحو 50% لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وبنسبة 98% لانبعاثات الغبار (سميل 2016). وانخفضت تكاليف الطاقة اللازمة لإنتاج الفولاذ من خلال الصب المتواصل للمعدن الساخن، حيث أدى هذا الابتكار إلى إمكانية فصل المنتج التقليدي عن القوالب، التي تطلبت إعادة تسخين قبل المضي بعملية الصب مرة أخرى.

لقد كانت زيادات الإنتاج التي تم التوصل إليها كبيرة بما يكفي لتترجم إلى قيم أسية حتى على مستوى الفرد: ففي عام 1850، وقبل بداية إنتاج الفولاذ حديثاً، كانت كمية الإنتاج السنوي من المعدن بطرائق حرفية لا تصل إلى 100.000 طن، أي مجرد 75 غ/سنة/فرد. وفي عام 1900 الذي وصل فيه الإنتاج إلى 30 ميغا طن، سجل المتوسط العالمي 18 كغ/فرد، ليرتفع عام 2000 إلى 850 ميغا طن ويسجل المتوسط العالمي 140 كغ/فرد، وبحلول عام 2015 وصل الإنتاج إلى 1.65 جيغا طن، بمتوسط نحو 225 كغ/فرد، أي أعلى بقرابة 12 ضعفاً قياساً بعام 1900. وتظهر حساباتي أنه عام 2013 تطلب إنتاج الحديد والفولاذ على مستوى العالم ما لا يقل على 35 إكسا جول من الوقود والكهرباء، أو أقل من 7% من إجمالي الإمداد العالمي بالطاقة الأولية، ما يجعله أكبر قطاع صناعي استهلاكاً للطاقة على مستوى العالم (سميل 2016)، وذلك قياساً بنسبة 23% لالصناعات الأخرى كافة، و27% للنقل، و36% للاستخدامات المنزلية والخدمات. لكن في حال بقيت شدة الطاقة للقطاع كما كانت خلال ستينيات القرن الماضي، عندها ستكون هذه الصناعة قد استهلكت ما لا يقل عن 16% من الإمداد العالمي بالطاقة الأولية عام 2015، ما يشكل توضيحاً مثيراً للاهتمام للتطورات المتواصلة على مستوى الكفاءة.

لعل الابتكار الذي يزيد أهمية عن غيره بأشواط بعيدة عن مجال تعدين الحديد كان تطور صهر الألمنيوم. فقد تم عزل هذا العنصر عام 1824، إلا أن تصنيعه بهدف الإنتاج على نطاق واسع والاستفادة منه اقتصادياً لم يتم إلا عام 1866. واعتمدت الابتكارات المستقلة لتشارلز م. هول M. Hall في الولايات المتحدة وب. ل. ت. هيرولت P. L. T. Héroult في فرنسا على التحليل الكهربائي لأكسيد الألمنيوم. وكان الحد الأدنى للطاقة المطلوبة لفصل المعدن أعلى بأكثر من ستة أضعاف الطاقة المطلوبة لصهر الحديد. الأمر الذي جعل صهر الألمنيوم بطيء التطور حتى بعد البدء بتوليد الكهرباء على نطاق واسع. وخلال ثمانينيات القرن التاسع عشر، تجاوزت المتطلبات النوعية من الكهرباء 50.000 ك واط سا/طن ألمنيوم، حيث عملت التطورات المطردة اللاحقة لعملية هول-هيرولت Hall-Héroult على خفض هذه النسبة بأكثر من الثلثين بحلول عام 1900 (سميل 2014ب).

اتسعت نطاقات استخدام الألمنيوم مع تطور الطيران. فالأجسام المعدنية حلت محل نظيرتها الخشبية والقماشية خلال أواخر عشرينيات القرن الماضي، كما شهد الطلب ارتفاعاً حاداً خلال الحرب العالمية الثانية لصناعة المقاتلات والقاذفات. ومنذ عام 1945 بات الألمنيوم وخلائطه بديلاً عن الفولاذ حيثما تطلب التصميم الجمع بين الخفة والقوة. وتراوح مجال استخداماته من

السيارات، إلى عربات السكك الحديدية قمعية الشكل[31]، والمركبات الفضائية، إلا أن الخلائط الفولاذية الجديدة الخفيفة باتت أيضاً تخدم هذه السوق اليوم. ومنذ خمسينيات القرن الفائت حل التيتانيوم محل الألمنيوم في التطبيقات التي تتطلب تحمل درجات حرارة مرتفعة، وعلى رأسها الطائرات الأسرع من الصوت. أما إنتاجه فيحتاج إلى ما لا يقل عن ثلاثة أضعاف كثافة الطاقة المطلوبة لإنتاج الألمنيوم (سميل 2014ب).

صحيح أن الأهمية الرئيسة للمعادن المنتجة بكميات كبيرة غالباً ما تغفل في مجتمع تطغى عليه أحدث التطورات الإلكترونية، لكن تبقى التحولات التي شهدها التصنيع الحديث مسألة مؤكدة من خلال انصهاره مع الإلكترونيات الحديثة على نحو متواصل، وهو اتحاد حسن بشكل هائل من خيارات التصاميم المتاحة، وأدخل أدوات تحكم دقيق، ومنح مرونة غير مسبوقة، فضلاً عن أنه حقق تغيرات على مستوى مراقبة الأسواق والتوزيع والأداء. وقد أظهرت مقارنة دولية أن نسبة الخدمات التي تلقاها مصنعون في الولايات المتحدة من شركات خارجية عام 2005 بلغت 30% من القيمة المضافة إلى السلع النهائية مع نسب مماثلة (23-29%) في الاقتصادات الرئيسة للاتحاد الأوروبي، في حين أضافت المهن المتعلقة بالخدمات عام 2008 إلى أغلبية (53%) الأعمال في قطاع الصناعة التحويلية الأمريكي، وإلى 44-50% في ألمانيا وفرنسا والمملكة المتحدة، وإلى 32 % في اليابان (لوفينسون Levinson أ2012). ورغم عدم اختلاف الكثير من المنتجات ظاهرياً عن أسلافها، إلا أنها تبقى هجيناً شديد الاختلاف على أرض الواقع (المربع 5-6).

تعد السيارات من الأمثلة البارزة لصناعة تضع الأبحاث والتصميم والتسويق والصيانة في كفة لا تقل أهمية عن الإنتاج الفعلي للسلعة. حتى في حال زيادة استخدام الطاقة المدمجة (للعربة أو الحاسب أو تجميع منتج ما) (بفعل استخدام مواد تحتاج كثافة طاقة أعلى أو كتلة أكبر أو أداء أفضل) أو بقائها على ما هي عليه أو حتى تراجعها، فإن المخاوف، غير تلك المتعلقة بالانشغال بالكمية المنتجة، باتت تحمل أهمية كبيرة، ولعل أولها المظهر وتميز الطراز واعتبارات النوعية، إذ يحمل هذا الاتجاه تأثيرات جسيمة على مستوى استخدام الطاقة مستقبلاً وهيكل القوى العاملة على حدّ سواء، ولكن ليس بالضرورة أن تكون تلك التأثيرات بطريقة بسيطة وأحادية الاتجاه (لمزيد من المعلومات بهذا الخصوص، راجع الفصل السابع).

النقل

هنالك العديد من الصفات التي تنطبق على أشكال النقل كافة المعتمد على طاقة الوقود الأحفوري أو الكهرباء. فخلافاً للجانب التقليدي المعروف بنقل الناس والبضائع، نرى أن سرعة النقل زادت على نحو لا يصدق: فقد بات عشرات الملايين يعبرون الأطلسي كل عام في 6-8 ساعات، في حين كان عبور الأطلسي قبل قرن من الزمن يستغرق قرابة ستة أيام (هوجيل Hugill أ1993) وقبل 500 عام تطلب أول عبور للأطلسي خمسة أسابيع، كما ارتفعت موثوقية وسائط النقل على

نحو لا يقارن بما سبق: فحتى أفضل العربات التي تجرها أقوى الخيول تجد اجتياز ممرات جبال الألب تحدياً ينتهي بالاستسلام أمام تحطم محاور العجلات، وعجز الحيوانات، والعواصف الهوجاء، في حين نجد مئات رحلات الطيران تحلق اليوم فوق سلسلة الجبال، والقطارات تخترق الأنفاق العميقة بسرعة هائلة. وعلى مستوى النفقات، بلغ متوسط تكلفة عبور الأطلسي قبيل الحرب العالمية الأولى 75 دولاراً (دوبونت Dupont وكيلينج Keeling ووايس Weiss أ2012) أو نحو 1.900 دولار أمريكي وفق مكافئ العملة في عام 2015. أما رحلة العودة فتكلف نحو 4.000 دولار أمريكي بسعر اليوم قياساً بنحو 1.000 دولار لرحلة عادية بين لندن ونيويورك (من بدون حسومات).

في الوقت الذي اتسم فيه مطلع القرن التاسع عشر ببعض المكاسب المهمة من حيث استطاعات الوحدة وكفاءاتها، وفي التسخير الثابت للطاقات الحركية الطبيعية من خلال النواعير وطواحين الهواء، شهد النقل البري الذي يقتصر على طاقة العضلات الحيوية تغيراً طفيفاً جداً منذ العصور القديمة. فعلى مدى آلاف السنين، بقي السفر على صهوة جواد سريع الطريقة الأسرع للسفر، وبقيت العربة ذات التعليق الجيد لمئات السنين الطريقة الأقرب إلى السفر المريح. وفي عام 1800 عرفت بعض الطرقات بسطحها المتماسك أكثر من غيرها، وبالرغم من جودة نظام التعليق في كثير من العربات، إلا أنها كانت تتباين من حيث الدرجة وليس من حيث النوع. ثم جاءت الخطوط الحديدية لتزيح هذه الثوابت في غضون بضع سنين فهي لم تقلص المسافات وتعطي تعريفاً واضحاً للمكان فحسب، بل أدت مهامها بمستوى غير مسبوق من الراحة. وتم الوصول إلى سرعة ميل في الدقيقة (96 كم/سا) لأول

المربع 5-6

السيارات باعتبارها آليات ميكانيكية إلكترونية

ليس ثمة مثال عن الاندماج ما بين المكونات الميكانيكية والإلكترونية أفضل من سيارة الركاب الحديثة. ففي عام 1977 كانت سيارة تورنايدو من أولدسموبيل Oldsmobile والمزودة بمحرك جنرال موتورز أول منتج مزود بوحدة تحكم إلكتروني لضبط توقيت إطلاق الشرارة. وبعد أربعة أعوام كان لدى جنرال موتورز نحو 50.000 سطر للشفرة الخاصة ببرمجية التحكم بالمحرك في خط الإنتاج المحلي للسيارات (مادن Madden أ2015). فاليوم، حتى السيارات الرخيصة فيها حتى 50 وحدة تحكم إلكتروني، وقد تصل في بعض الطرازات الراقية (بما في ذلك مرسيدس بنز من فئة إس) إلى 100 وحدة تحكم إلكتروني متصلة معاً بشبكة وتدعمهما برمجية تحتوي على 100 مليون سطر، قياساً بـ 5.7 مليون سطر للبرمجية المطلوبة لتشغيل طائرة F-35، القاذفة والمهاجمة في سلاح الجو الأمريكي، أو 6.5 مليون سطر لطائرة بوينغ 787، وهو أحد طرز الطائرات النفاثة التجارية للشركة (تشاريت Charette أ2009).

وتشهد الأجهزة الإلكترونية للسيارات تعقيداً هي الأخرى، إلا أن مقارنة سطور التشفير تبقى خياراً مضللاً. فالسبب الرئيس وراء تخمة البرمجيات في السيارة يكمن في تغطية العدد الهائل من الخيارات والتشكيلات التي تمنحها الطرز الفارهة، بما في ذلك برامج المعلومات والترفيه والملاحة التي لا علاقة لها بالقيادة الفعلية؛ ثم إن هنالك كماً هائلاً من الشفرات المكرر استخدامها والفائضة وتلك التي يتم توليدها أوتوماتيكياً. مع ذلك، تمثل الأجهزة الإلكترونية والبرمجيات حتى 40% من تكلفة العربات الفاخرة: إذ تم تحويل السيارات من تجميعات ميكانيكية إلى هُجُن ميكانيكية إلكترونية، وكل إضافة لوظيفة تحكم مفيدة، كالتحذير بتخطي المسار، والفرملة الآلية لتجنب الاصطدام بالجانب الخلفي للسيارة التي تسير أمامك، أو التشخيصات المتطورة - توسع متطلبات البرمجيات وتضيف إلى تكلفة المركبة. لقد بات هذا الاتجاه واضحاً، إلا أن المركبات المستقلة كلياً وذاتية القيادة لن تصل بالسرعة التي يعتقدها كثير من المراقبين غير المتفقين مع الواقع.

مرة ولفترة قصيرة خلال رحلة إنجليزية مجدولة عام 1847؛ وهو العام الذي شهد فيه البلد أعظم نشاط لمد الخطوط الحديدية، حيث وضعت شبكة كثيفة مترابطة مع بعضها على نحو موثوق خلال فترة لم تتعد الجيلين (أوبرين O'Brien أ1983).

نفذت أعمال مدّ الخطوط الحديدية على نطاق واسع، والتي تزامنت مع صناعة القطارات التي تعمل بمحركات بخارية متزايدة القوة من خلال تغذيتها بوقود الفحم، في أوروبا وأمريكا الشمالية خلال فترة لم تصل إلى 80 سنة، فقد كانت عشرينيات القرن التاسع عشر عقد التجارب؛ وبحلول تسعينيات القرن نفسه استطاعت أسرع القطارات السير على امتداد بعض الأجزاء من السكة الحديد بسرعة تجاوزت 100 كم/سا. وبعد فترة قصيرة من إدخال عربات المسافرين، لم تعد تلك العربات مجرد عربات تسير فوق السكك، بل ظهرت فيها التدفئة والحمامات. أما المسافرون الذين يدفعون أسعاراً أعلى فقد تمتعوا بمقاعد وثيرة، وخدمات توفير الوجبات اللذيذة، ناهيك عن ترتيبات خاصة بالنوم. ولم تقتصر القطارات الأسرع والأكثر راحة على نقل الزوار والمهاجرين إلى المدن فحسب، بل نقلت سكان المناطق الحضرية إلى الريف أيضاً. وعرض توماس كوك برامج لقضاء العطلات عن طريق الخطوط الحديدية بدءاً من عام 1841. أما الخطوط الحديدية المناسبة للراكب الذي يسافر يومياً إلى عمله فقد جعلت من أول موجة هائلة نحو الانتقال للعيش في المناطق المحيطة بالمدن مسألة ممكنة. في حين تمكنت قطارات الشحن المتزايدة السعة من نقل موارد هائلة إلى المناطق الصناعية البعيدة، وبالمقابل وزعت منتجات تلك المناطق على جناح السرعة.

وسرعان ما تفوقت إنشاءات الخطوط الحديدية الأمريكية التي بدأت عام 1838 في فيلاديلفيا على إجمالي طول الخطوط الحديدية البريطانية. وبحلول عام 1860 كان لدى الولايات المتحدة مسار بطول 48.000 كم، أي أطول بثلاث مرات من إجمالي طول الخطوط الحديدية في المملكة المتحدة. وفي عام 1900 بلغ الفارق عشرة أضعاف تقريباً. أما الخط الرابط الأول العابر للقارات فجاء عام 1869، ومع نهاية القرن كانت أربعة خطوط إضافية مثله قد أنشئت (هبارد

Hubbard أ1981). كذلك شهدت التطورات الروسية تقدماً سريعاً إلى حدّ ما. فقد وضعت خطوط بطول أقل من 2.000 كم عام 1860، إلا أن إجمالي المسار تعدى 30.000 كم بحلول 1890، ليصل إلى نحو 70.000 كم بحلول عام 1913 (فالكوس Falkus أ1972). أما الخط الرابط العابر للقارات المار من سيبيريا إلى فلاديفوستوك، والذي بدأ العمل به عام 1891، فلم يستكمل كلياً حتى عام 1917. وعندما انسحب البريطانيون من الهند عام 1947 تركوا وراءهم نحو 54.000 كم من الخطوط (و69.000 كم في جميع أرجاء شبه القارة). إلا أنه لم ينشئ أي بلد آسيوي آخر شبكة خطوط حديدية رئيسة قبل الحرب العالمية الثانية.

ومنذ نهاية الحرب العالمية الثانية، أدى التنافس من جانب السيارات والحافلات والطائرات إلى تراجع الأهمية النسبية لخطوط السكك الحديدية في جل البلدان الصناعية، لكن خلال النصف الأخير من القرن العشرين، كان الاتحاد السوفييتي والبرازيل والعراق والجزائر من البلدان التي شهدت نشاطاً في مد خطوط جديدة. أما الصين فكانت الرائدة على المستوى الآسيوي، حيث أضافت ما يربو على 30.000 كم من الخطوط بين عام 1950 و1990. إلا أن الابتكار الأكثر نجاحاً خلال فترة ما بعد الحرب العالمية الثانية كان القطار الكهربائي السريع المخصص للمسافات الطويلة. أما القطار الياباني شينكانسن *shinkansen* فقد انطلق لأول مرة عام 1964 بين طوكيو وأوساكا، ووصلت سرعته القصوى إلى 250 كم/سا، بينما وصلت سرعة آخر قطاراتها (*nozomi*) إلى 300 كم/سا (سميل 2014أ؛ الشكل 6-10). تعمل القطارات الفرنسية عالية السرعة (TGV) منذ عام 1983؛ حيث وصلت أسرع رحلة منتظمة إلى قرابة 280 كم/سا. وبالمثل، هنالك قطارات سريعة أيضاً في إسبانيا (AVE) وفي إيطاليا (*Frecciarossa*) وألمانيا (*Intercity*)، إلا أن الصين باتت الحامل الجديد للرقم القياسي من حيث الطول الإجمالي للخطوط عالية السرعة: ففي عام 2014 بلغ طول المسار المخصص لهذه السرعة 16.000 كم (زينهوا Xinhua أ2015). لكن بالمقابل يبقى



الشكل 10-6

القطار شينكانسين Shinkansen من سلسلة N700 في أثناء وجوده في محطة كيوتو عام 2014، العام الخمسون على تشغيل القطارات السريعة اليابانية من دون حوادث على خط توكايدو. حقوق الصورة لـ ف. سميل.

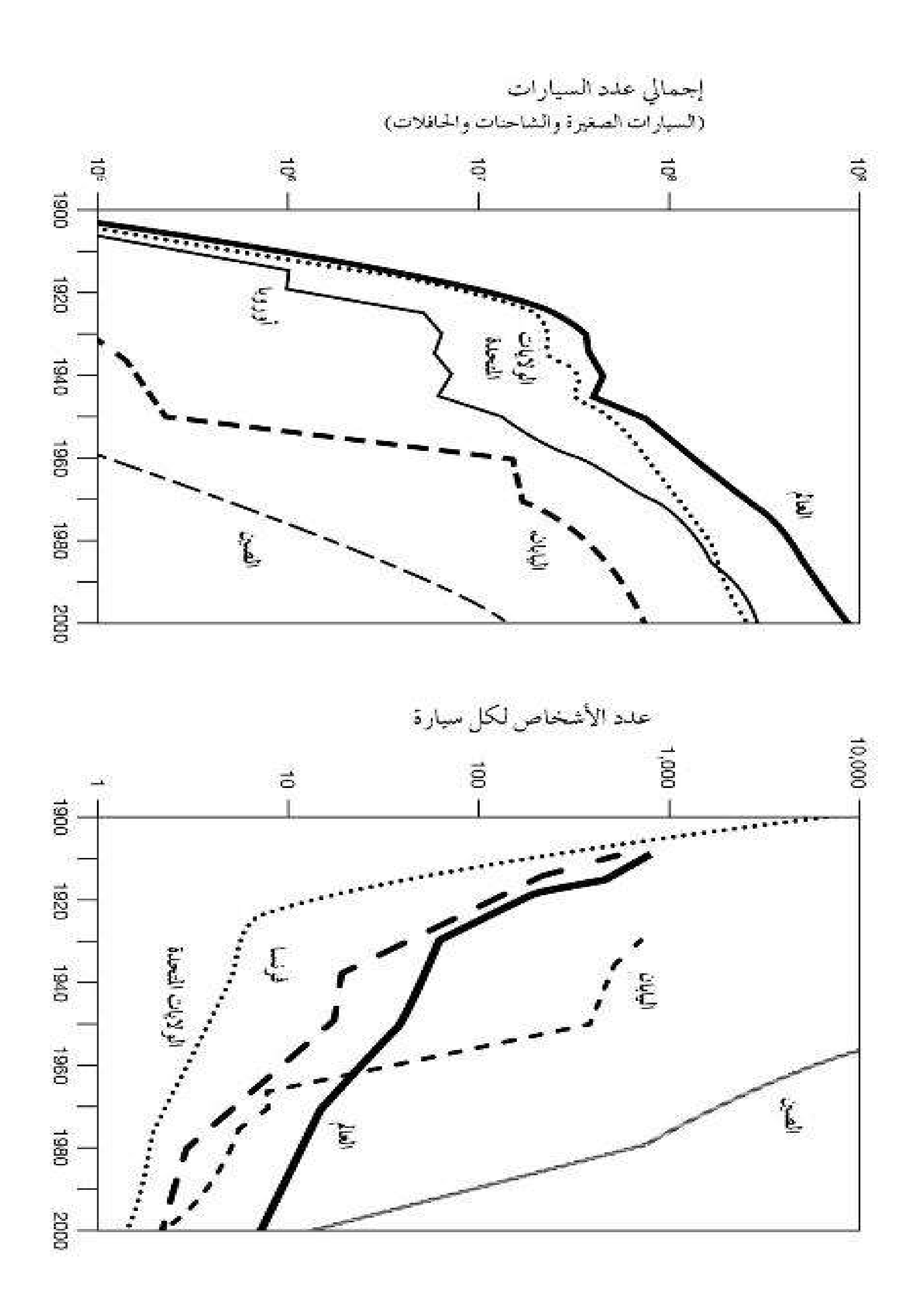
القطار الأمريكي الوحيد *Acela* (المسيّر بين بوسطن وواشنطن، بسرعة متوسطة بالكاد تتعدى 100 كم/سا) غير مؤهل ليصنف كقطار حديث عالي السرعة.

ولو بدأنا العد منذ إدخال أول محركات عملية تعمل بالبنزين خلال أواخر ثمانينيات القرن التاسع عشر، لوجدنا أن ثورة النقل الثانية على الطرقات البرية، وتطور المركبات المخصصة للطرقات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي، تطلبت زمناً لا يقل عن سابقتها. ففي البلدان حيث الدخل أعلى منه في أوروبا وأمريكا الشمالية، شهدت تلك التطورات فترتين من الانقطاع خلال الحربين

العالميتين. وبينما كان لدى الولايات المتحدة نسبة ملكية مرتفعة أصلاً للسيارات خلال أواخر عشرينيات القرن الماضي، لم تصل أوروبا واليابان إلى مرحلة مقارنة مع تلك في الولايات المتحدة إلا في ستينيات القرن العشرين، في حين لم يبدأ عصر ملكية السيارات من قبل أعداد كبيرة في الصين إلا عام 2000، لكن نظراً لضخامة عدد السكان في البلد والاستثمارات السريعة في مصانع جديدة، فقد تجاوزت مبيعات الصين من السيارات إجمالي نظيرتها في الولايات المتحدة عام 2010، حيث بلغ عدد سيارات الركاب خلال تلك الفترة 870 مليون سيارة على مستوى العالم، وما يزيد على مليار مركبة مخصصة للطرقات (الشكل 6-11).

تحتل التغيرات الاقتصادية والاجتماعية والبيئية التي أحدثتها السيارات مكانة بارزة بين التحولات الكبرى في العصر الحديث (لينج Ling أ1990؛ ووماك Womack، وجونز Jones، وروس Roos أ1991؛ وإكرمان Eckermann أ2001؛ وماكستون Maxton وورمالد Wormald أ2004). (وقد ظهرت صناعة السيارات انطلاقاً من الولايات المتحدة خلال منتصف عشرينيات القرن الماضي) في بلد تلو الآخر كصناعة رائدة من حيث قيمة المنتج. كما باتت السيارات سلعاً رئيسة في التجارة الدولية، إذ حققت صادراتها من ألمانيا (بعد عام 1960) وصادراتها بأعداد أكبر من اليابان (بعد عام 1970) فائدة جمة طالت اقتصاد البلدين لعقود. أما كبرى فئات الصناعات الأخرى، وعلى رأسها صناعة الفولاذ والمطاط والزجاج والبلاستيك وتكرير النفط، فتعتمد على صناعة السيارات وقيادتها. وشاركت الدولة بشكل هائل في فتح الطرقات السريعة، ما أدى إلى ظهور استثمارات ضخمة وتراكم رأس المال. وكانت طرقات هتلر السريعة *Autobahnen* خلال ثلاثينيات القرن الماضي قد سبقت شبكة أيزنهاور للطرقات الرابطة بين الولايات الأمريكية بنحو جيل من الزمن (حيث بدأت عام 1956، وزاد إجمالي طولها عن 77.000 كم)، إلا أن الشبكة الوطنية للطرقات السريعة في الصين تفوقت على الشبكة آنفة الذكر بطول إجمالي وصل إلى 112.000 كم عام 2015.

من المؤكد أن أبرز التأثيرات التي تمخضت عن وضع السيارات في الخدمة تمثلت في إعادة تنظيم المدن من خلال انتشار الطرقات السريعة ومواقف السيارات



إجمالي عدد السيارات
(السيارات الصغيرة والشاحنات والحافلات)
1900
1920
1940
1960
1980
2000
العالم
الولايات المتحدة
أوروبا
اليابان
الصين
عدد الأشخاص لكل سيارة
1
10
100
1,000
10,000
1900
1920
1940
1960
1980
2000
الولايات المتحدة
فرنسا
اليابان
العالم
الصين

الشكل 11-6

شهد إجمالي عدد المركبات المخصصة للطرقات البرية حول العالم نمواً من 10.000 مركبة عام 1900 إلى ما يربو على مليار مركبة عام 2010 (اليسار). أما المركبات المسجلة في الولايات المتحدة فبقيت خلف إجمالي عدد المركبات المسجلة في أوروبا خلال أواخر ثمانينيات القرن الماضي، إلا أن البلد لا يزال هو الأعلى من حيث معدل الملكية بنحو 1.24 شخص لكل مركبة عام 2010 (اليمين). المخططات مقتبسة من بيانات التقارير السنوية لجمعية مصنعي المركبات ذات المحركات والبنك الدولي (2015ب).

وتدمير الأحياء. فحيثما سمح المجال، اتسع محيط العيش في الضواحي (وما هو أبعد من الضواحي أيضاً في أمريكا الشمالية)، لتتغير مع هذا التحول مواقع التسوق والخدمات وأشكالها. أما التأثيرات الاجتماعية فكانت أعظم. إذ كانت ملكية السيارة جانباً مهماً من «البرجزة»، حيث تمتعت بعض التصاميم يسيرة التكلفة، التي سمحت لجموع الناس بامتلاك السيارة، باستمرارية مدهشة (سيورو Siuru أ1989). وكان أولها الطراز T من فورد، الذي انخفض سعره ليصل إلى 265 دولاراً عام 1923 واستمر إنتاجه 19 عاماً (مكالي McCalley أ1994). ومن الطرازات الأخرى البارزة أوستن سيفن، موريس ماينور وستروين 2CV، ورينو 4CV وفيات توبولينو، والأكثر شعبية بينها فولكس فاغن لفرديناند بورشة والمستلهمة من هتلر (المربع 6-6).

وحملت حرية التنقل الشخصي تأثيرات هائلة ظهرت آثارها في تغيير السكن والعمل، حيث أثبتت تلك الحرية أنها تسبب الإدمان. فتشبيه بولدينج Boulding أ(1974) للسيارة على أنها جواد ميكانيكي يحول سائقها إلى فارس ارستقراطي الطبع في تنقله، لا يكف عن رمق الفلاحين بنظرة دونية (تدل على أن العودة إليهم مسألة لا يتقبلها العقل) ليس بالتشبيه المبالغ فيه. ففي عام 2010 كان هنالك 1.25 شخص لكل مركبة تعمل بالمحرك (بما فيها الشاحنات والحافلات) في الولايات المتحدة، بينما كانت النسبة 1.7 في كل من ألمانيا واليابان (البنك الدولي 2015ب). ولعل انتشار الإدمان على التنقل تبعاً للطلب يجعل التخلي عن هذه العادة مسألة صعبة: ففي أعقاب تراجع مبيعات السيارات الناجم عن الركود بين عامي 2009 و2011، عاودت المبيعات انتعاشها لتسجل مستويات شبه قياسية بنحو 16.5 مليون وحدة عام 2015.

لقد قطعنا مسافات استثنائية للمحافظة على هذا الامتياز (وفي أمريكا الشمالية سهلنا الأمر أكثر ببيع ما يزيد على 90% من مجمل المركبات بالدين)، مع هذا لا عجب أن نرى الصينيين والهنود يرغبون في مضاهاة تجربة أمريكا الشمالية. لكن هذه الخطوة، شأنها شأن أي من حالات الإدمان، كانت باهظة الثمن. ففي عام 2015 سار

المربع 6-6

فولكس فاجن وغيرها من الطُرز المعمرة

فيما يتعلق بإجمالي الإنتاج، والحجم، والديمومة (بما في ذلك الطرز المحدثة أيضاً)، لا توجد سيارة صممت للجماهير كتلك التي عرّفها أدولف هتلر Adolf Hitler بأنها السيارة الأكثر ملاءمة لشعبه (نيلسون 1998؛ باتون 2004). وفي خريف عام 1933 حدد هتلر مواصفات السيارة - كالسرعة القصوى 100 كم/سا، واستهلاكها 7 ل/كم، وقدرتها على نقل شخصين بالغين وثلاثة أطفال، مع تبريد بالهواء، بتكلفة أقل من 1.000 رايخ مارك - أما فرديناند بورشه Ferdinand Porsche أ(1875-1951) فقد أعد السيارة للإنتاج عام 1938، حيث كانت قبيحة الشكل نوعاً ما وتبدو، بناءً على إصرار هلتر، أشبه بالخنفساء (*Käfer*). إلا أن الحرب منعت جميع أشكال الإنتاج المدني، حيث لم يبدأ تجميع الخنفساء لإنتاجها المتسلسل إلا عام 1945 تحت قيادة الجيش البريطاني بقيادة الرائد إيفان هيرست Ivan Hirst أ(1916-2000) الذي أنقذ المصنع المدمر (فولكس فاجن AG أ2013).

وخلال السنوات الأولى لألمانيا الغربية *Wirtschaftswunder* (قبل الملكية الجماعية لمرسيدس وأودي وBMW)، أغرقت هذه السيارة شوارع البلد، وباتت فولكس فاجن خلال ستينيات القرن الماضي أكثر السيارات المستوردة شعبية في الولايات المتحدة قبل أن تحل محلها هوندا وتويوتا. وتوقف إنتاج الخنفساء الأصلية في ألمانيا عام 1977 لكنه استمر في البرازيل حتى عام 1996 وفي المكسيك حتى عام 2003، لتحمل آخر سيارة أنتجت من هذا الطراز في معمل بيوبيلا الرقم 21.529.464. أما الخنفساء الجديدة التي أعاد تصميمها الخارجي ج. مايس ووضع المحرك في الجهة الأمامية للسيارة، فقد صنعت بين عامي 1997 و2011، ليأتي آخر التصاميم من بعد ذلك عام 2012 وهو طراز A5 الذي عاد إلى طراز الخنفساء من فولكس فاجن.

أما رينو 4CV التي صُممت سراً خلال الحرب العالمية الثانية فكانت النظير الفرنسي للخنفساء، حيث صنع منها ما يزيد على مليون سيارة بين عامي 1945 و1961. أما السيارة الأساسية الأشهر في ذلك البلد فكانت ستروين 2CV، التي صنعت بين عامي 1940 و1990، أما عبارة «حصانان» deux cheveaux فكان يقصد منها عدد الأسطوانات؛ إذ كان المحرك بقوة 29 حصاناً (سيورو 1989). أما توبولينو، الفأر الصغير من فيات، السيارة ذات المقعدين وبقاعدة عجلات لا تزيد على مترين، فقد صنعت بين عامي 1936 و1955، بينما صنعت سيارة موريس ماينور البريطانية بين عامي 1948 و1971. إلا أن نجم جميع هذه الطرازات قد أفل بعد أن أشرقت شعبية التصاميم اليابانية، حيث باتت بعد تصديرها بكميات صغيرة نسبياً خلال ستينيات وسبعينيات القرن الماضي السيارات أفضل مبيعاً في العالم خلال ثمانينيات القرن عينه.

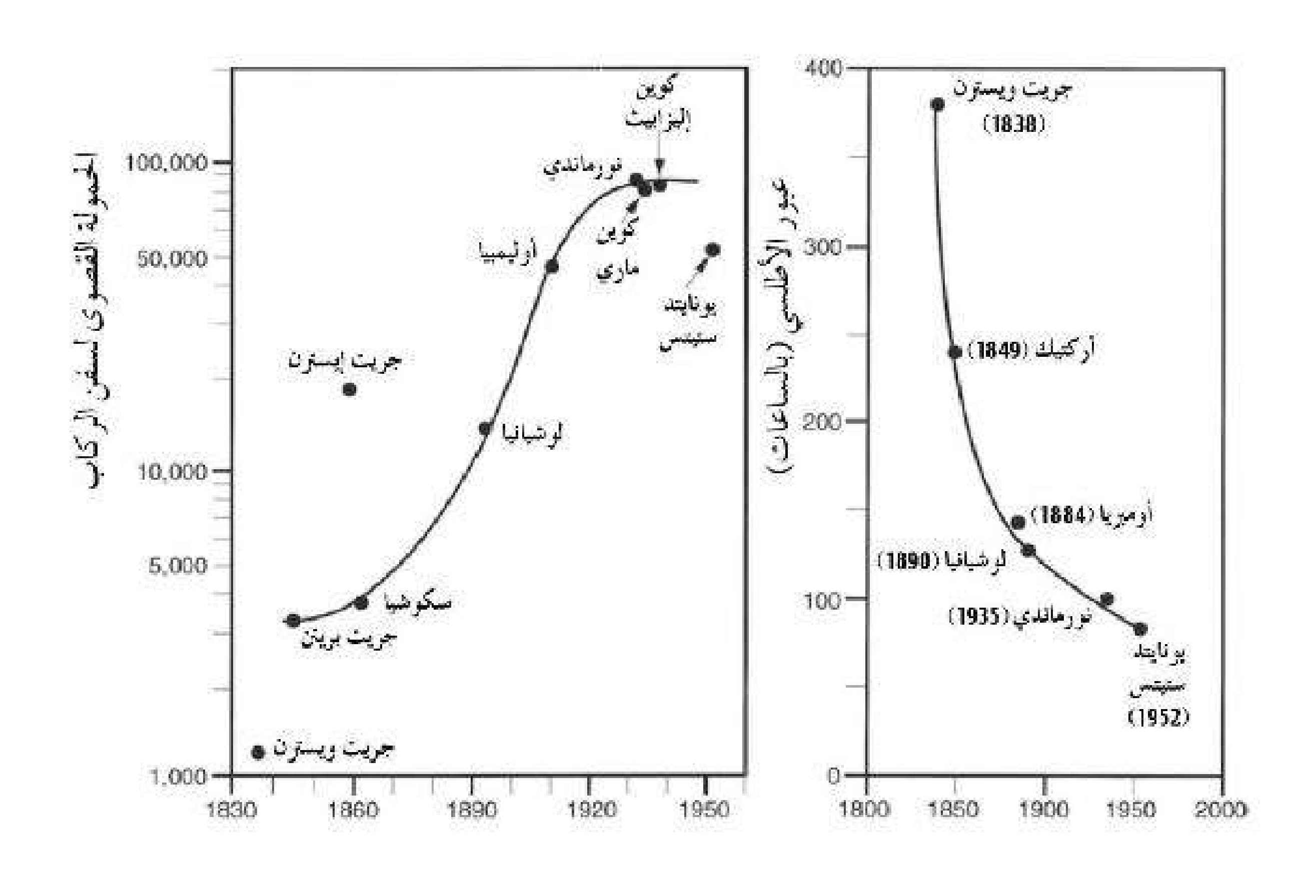
على طرقات العالم نحو 1.25 مليار مركبة، وفي عام 2015 وصلت المبيعات الجديدة لسيارات الركاب إلى نحو 73 مليون مركبة (مصرف نوفا سكوشا 2015)، في حين تسببت الحوادث في حصد أرواح قرابة 1.3 مليون شخص سنوياً وإصابات وصلت حتى 50 مليون شخص (منظمة الصحة العالمية ب)، فضلاً عن أن تلوث الهواء كان المسهم الرئيس في ظاهرة «الضباب الدخاني (الضخان)» الضوئي الكيميائي الموسمية (أو شبه الدائمة) في المدن الضخمة في القارات كافة (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة 2004). أما متوسط عمر السيارات اليوم فيتراوح بين قرابة 11 سنة في البلدان التي تنعم بالرخاء وأكثر من 15 سنة في اقتصادات الدخل المنخفض. ومن ثم، يخضع معظم الفولاذ في تلك السيارات (والنحاس وبعض المطاط) لإعادة التدوير، إلا أننا تسامحنا مع كلفتها الباهظة من أرواح وأضرار وتلوث.

سبب النقل بالشاحنات كثيراً من التبعات الاجتماعية والاقتصادية العميقة. إذ عمل انتشارها بأعداد كبيرة في الريف الأمريكي لأول مرة بعد عام 1920 على خفض تكاليف نقل منتجات المزارع إلى السوق فضلاً عن تسريع تلك العملية. عمّت هذه المنافع أوروبا واليابان في البداية، لتنتقل خلال العقدين الماضيين إلى كثير من بلدان أمريكا اللاتينية وآسيا. ففي البلدان الغنية، كان النقل بوساطة الشاحنات الثقيلة لمسافات بعيدة شريان إيصال الأغذية، ناهيك عن أنه شكل شبكة رابطة رئيسة لتوزيع القطع الصناعية والسلع المصنعة، حيث أفاد تشغيلها من اعتماد عالمي للحاويات التي تفرغ من السفن العابرة للمحيطات بوساطة رافعات تحمّل تلك الحاويات مباشرة على ظهر شاحنات مسطحة. وفي كثير من الاقتصادات سريعة النمو، أدى اعتماد الشاحنات إلى تجنب إنشاء السكك الحديدية (لعل البرازيل المثال الأفضل في هذا المقام) وفتح مناطق نائية جديدة أمام التجارة والتنمية - من دون أن ننسى ما أحدثته هذه الخطوة من تدمير للبيئة. وفي الأمم الفقيرة كانت الحافلات الوسيلة الرائدة لنقل المسافرين إلى مسافات بعيدة.

لم تكن أولى السفن البخارية العابرة للمحيط الأطلسي أسرع من أفضل السفن الشراعية المعاصرة لها إذا ما هبت الرياح بما تشتهي. لكن مع أواخر أربعينيات القرن التاسع عشر أمسى تفوق المحرك البخاري جلياً، حيث انخفضت أقصر رحلة عبور للأطلسي إلى أقل من 10 أيام (الشكل 6-12). وبحلول عام 1890 باتت الرحلات التي تستغرق أقل من ستة أيام عرفاً سائداً، شأنه شأن الهياكل الفولاذية. إذ تحرر الفولاذ من قيود الحجم: فالاعتبارات المرتبطة بالهيكل حددت طول الهياكل الخشبية بنحو 100 م. وأصبحت السفن الضخمة العاملة على هذه الخطوط الشهيرة كسفينة كونارد أو كولينز أو هامبورغ أمريكا رموزاً للعصر التقني. فقد جُهزت بمحركات جبارة ومراوح لولبية مزدوجة وفرشت كبائنها بأفخر المفروشات، وقدمت فيها أفضل الخدمات الممتازة.

وعلى الجانب الآخر من هذه الأبهة التي وُصفت بها تلك السفن العظيمة، كانت هنالك ممرات عرفت بانحشار المسافرين فيها وبروائحها النتنة وما يرافق ذلك من تململ عند اختيار أرخص مكان للسفر على السفينة. وفي عام 1890 نقلت السفن البخارية ما يزيد على نصف مليون مسافر في العام إلى نيويورك. وبحلول أواخر عشرينيات القرن الماضي، تجاوز إجمالي المسافرين عبر شمال الأطلسي المليون مسافر في العام، حيث سرعان ما وصلت السفن إلى أقصى حمولة لها (الشكل 6-12). لكن في عام 1957، حملت الطائرات عدداً أكبر من المسافرين عبر الأطلسي

قياساً بالسفن، ليكون إدخال خدمة منتظمة بوساطة الطائرات النفاثة في العام عينه قضى تماماً على السفر بحراً لمسافات طويلة: فبعد عقد من الزمن وصلت خدمة السفر وفق جداول زمنية منتظمة عبر الأطلسي إلى نهايتها. أما استكمال أعمال قناة السويس عام 1869 وإدخال التبريد الفعال خلال ثمانينيات القرن التاسع عشر فكان بمثابة تعزيز مبكر للسفن البخارية التجارية التي لقي نموها لاحقاً تشجيعاً آخر مع افتتاح قناة بنما عام 1914، وانتشار محركات الديزل الضخمة (بعد عام 1920) ونقل النفط الخام. ومنذ خمسينيات القرن الماضي، ظهرت حاجة إلى سفن ضخمة مختصة لا لنقل النفط فحسب، بل لنقل الكميات الكبيرة من السلع التي يتم تداولها تجارياً على



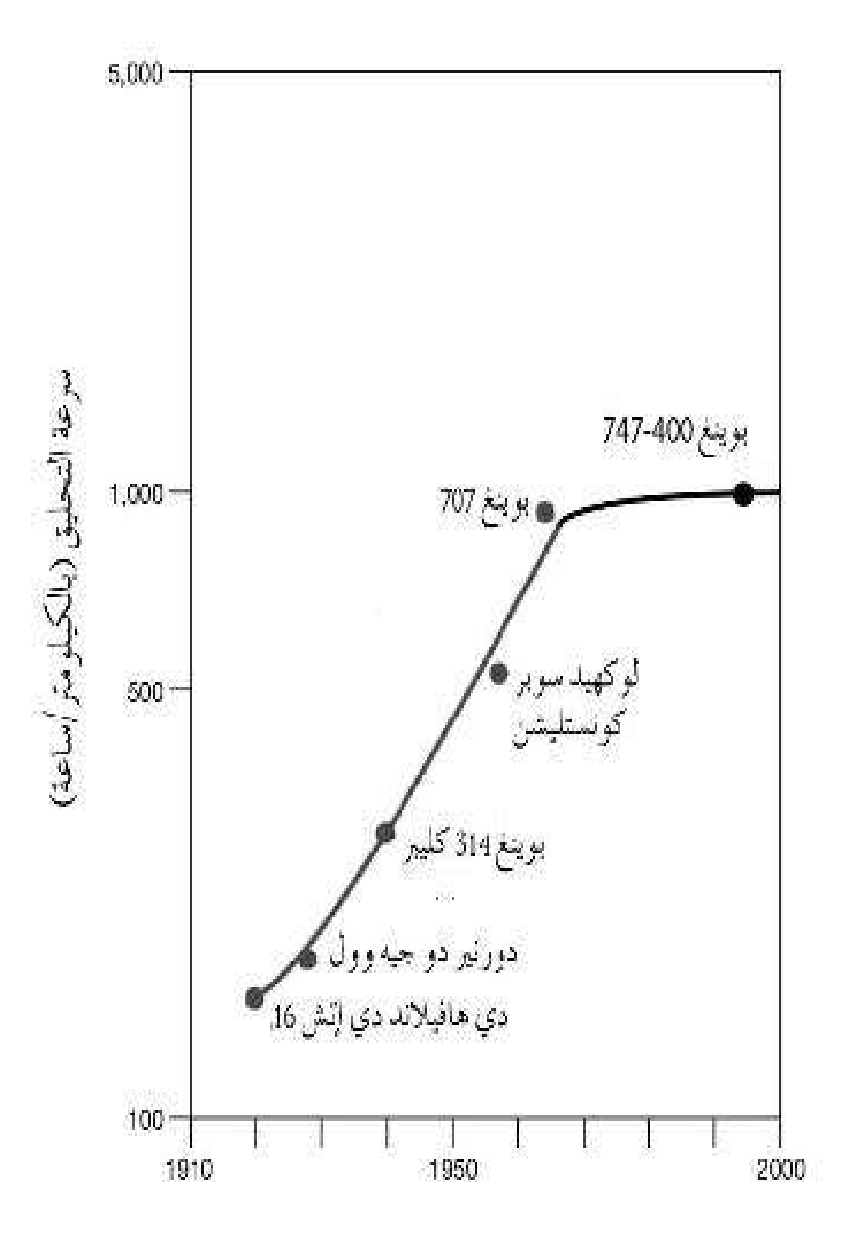
الشكل 12-6

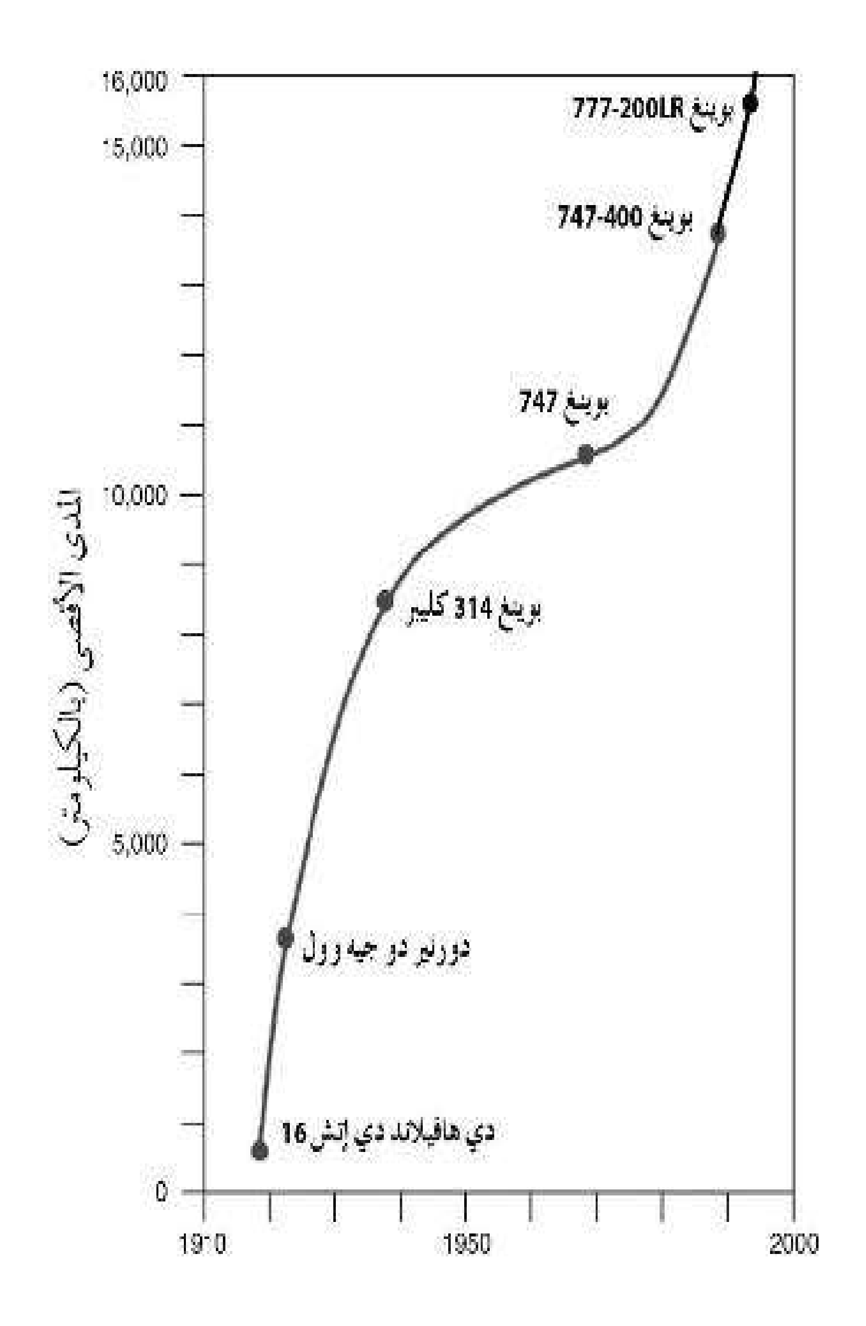
مع زيادة حجم السفن التي تربط أوروبا بأمريكا الشمالية (اليسار) وتجهيزها بمحركات أقوى، انخفض الزمن المطلوب لعبور الأطلسي من أكثر من أسبوعين إلى فترة تزيد بقليل على ثلاثة أيام (اليمين). المخطط مقتبس من بيانات فراي Fry أ(1896)، كوريل Croil أ(1898)، ستوبفورد Stopford أ(2009).

نطاق واسع (كالفلزات والأخشاب والحبوب والمواد الكيميائية) ونمو شحنات السيارات والآلات والبضائع الاستهلاكية.

بدأ النقل الجوي الدولي برحلات يومية مجدولة بين لندن وباريس عام 1919 بسرعة أقل بكثير من 200 كم/سا، ثم تطور إلى خطوط منتظمة عبر المحيط قبيل الحرب العالمية الثانية: فقد وصلت طائرة كليبر التابعة لشركة بان آم إلى هونج كونج من سان فرنسيسكو بعد رحلة لمدة ستة أيام في مارس/آذار 1939 (الشكل 6-13). إلا أن عصر السفر الجوي بأعداد كبيرة لم يبصر النور إلا مع إدخال الطائرة النفاثة في أواخر خمسينيات القرن الماضي (أخرجت طائرة «كوميت البريطانية» من الخدمة عام 1954 بعد أن دخلتها عام 1952 وذلك إثر ثلاث كوارث قاتلة). أما طائرة بوينغ 707 (التي كانت أولى رحلاتها عام 1957 والتي دخلت الخدمة في أكتوبر/تشرين الأول 1958) فقد تلتها طائرة بوينغ 727 للمسافات المتوسطة (والتي دخلت الخدمة المنتظمة في فبراير/شباط 1964 واستمر إنتاجها حتى 1984) وبوينغ 737 للمسافات القصيرة والمتوسطة، حيث باتت هذه الطائرة النفاثة الأصغر بين طرازات بوينغ الأكثر مبيعاً في التاريخ: ففي منتصف عام 2015 تم تسليم ما يزيد على 8.600 طائرة (قياساً بنحو 9.200 بالنسبة لطائرات إيرباص كافة). وخلال خمسينيات وستينيات القرن الماضي قدمت شركات مكدونل دوغلاس (DC-أ9، وDC-أ10 ثلاثية المحركات) وجنرال داينامكس (كونفاير) ولوكهيد (ترايستار) وسود أفيايشن (كارافيل) طائرتها النفاثة، لكن (إذا ما نحينا المنتج الروسي جانباً) مع نهاية القرن، لم يبق في الساحة إلا الاحتكار الثنائي الممثل في شركة بوينغ الأمريكية واتحاد إيرباص الأوروبي (مربع 6-4).

إن سرعة تلك الطائرات ومجالها، فضلاً عن انتشار الخطوط الجوية والرحلات الجوية، والربط الشامل لنظم الحجز أتاح السفر بين المدن الرئيسة كافة على الكوكب من الناحية الافتراضية في يوم واحد (الشكل 6-13). وبحلول عام 2000 وصل المدى الأقصى للطائرات النفاثة ذات الجسم العريض إلى 15.000 كم، وفي عام 2015 استغرقت أطول رحلات مجدولة (دالاس - سيدني، وجوهانسبرغ - أطلنطا) قرابة 17 ساعة، بينما ترتبط مدن كثيرة برحلات طيران مكوكية (في عام 2015 بلغ عدد الرحلات الجوية اليومية قرابة 300 رحلة بين ريو دي جانيرو وساو باولو وقرابة 200 رحلة بين نيويورك وشيكاغو). أضف إلى ذلك أن تكاليف الطيران كانت تتراجع باطراد وفق القيمة الحقيقية، وذلك يعود جزئياً إلى انخفاض استهلاك الوقود. وقد فتحت هذه الإنجازات الباب أمام فرص عمل جديدة، وكذلك أمام السياحة الجماعية لمسافات بعيدة نحو مدن رئيسة وإلى شواطئ في المناطق المدارية والاستوائية. أضف إلى ذلك أن هذه الإنجازات فتحت باب إمكانيات جديدة لحركة غير مسبوقة من الهجرة واللجوء، وكذلك لتفشي تهريب المخدرات، والإرهاب الدولي بما في ذلك اختطاف الطائرات.


سرعة التحليق (بالكيلومتر/ساعة)
5,000
1,000
500
100
1910
1950
2000
بوينغ 747-400
بوينغ 707
لوكهيد سوبر كونستليشن
بوينغ 314 كليبر
دورنير دو جيه وول
دي هافيلاند دي إتش 16


المدى الأقصى (بالكيلومتر)
16,000
15,000
10,000
5,000
0
1910
1950
2000
بوينغ 777-200LR
بوينغ 747-400
بوينغ 747
بوينغ 314 كليبر
دورنير دو جيه وول
دي هافيلاند دي إتش 16

الشكل 13-6

بلغ متوسط سرعة أولى الرحلات التجارية المنظمة التي قامت بها دو هافيلاند دي إتش De Haviland D. H. أكثر من 150 كم/سا بقليل وكان مداها الأقصى 600 كم (إلى اليسار). وفي أواخر الخمسينيات استطاعت طائرة البوينغ 707 الطيران بسرعة 1.000 كم/سا وبنهاية التسعينيات كان باستطاعة طائرة البوينغ 777 قطع أكثر من 15.000 كم (إلى اليمين). أما طائرة الكونكورد، التي بلغت سرعتها ضعفي سرعة الصوت، فكانت استثناء عالي التكلفة، ولم تكن في طليعة جيل جديد من الطائرات السريعة. مقتبسة من معلومات في تايلور Taylor أ(1989) وغنستون Gunston أ(2002) ومن مواصفات تقنية من موقع شركة بوينغ.

المربع 7-6

بوينغ وإيرباص

بوينغ شركة أمريكية قديمة - أسسها وليم بوينغ (1881-1956) عام 1916 - وصانعة لهذه التصاميم الأيقونية مثل بوينغ 314 كليبر و307 ستراتولاينر (وكلاهما عام 1938)، وبوينغ 707 (أول طائرة نفاثة ناجحة عام 1957) وبوينغ 747، أول طائرة ذات جسم عريض في عام 1969 (بوينغ 1915). أما أحدث ابتكارات الشركة فكانت الطائرة بوينغ 787، ذات التصميم المتطور المستخدم لألياف الكربون الأخف وزناً والأعلى صلابة في 80% من جسمها، ما يتيح زيادة في كفاءة استخدام الوقود بنسبة 20% قياساً بطائرة 767 (بوينغ 2015). أما إيرباص فقد أسست في ديسمبر/كانون الأول عام 1970 بشراكة فرنسية وألمانية، لتنضم لاحقاً إليهما شركات إسبانية وبريطانية. وأطلقت أول طائرة بمحركين، إيرباص A300 أ(226 مسافراً)، في أكتوبر/ تشرين الأول 1972، حيث اتسع نطاق عروضها ليغطي كامل أنواع الطائرات، من طائرات المسافات القصيرة A319 و320 و321 إلى طائرات المسافات الطويلة ذات الجسم العريض A340. وفي عام 2000 تفوقت إيرباص لأول مرة من حيث عدد الطائرات المباعة على بوينغ. أما أعظم ابتكاراتها فتمثل في الطراز A380، الطائرة ذات الجسم العريض المؤلفة من طابقين التي دخلت الخدمة منذ 2007 بسعة قصوى 853 مسافراً ضمن درجة واحدة، لكن، حتى اليوم تم الطلب عليها بتشكيلة ثلاث درجات تتسع لـ 538 راكباً (قياساً بـ 413 راكباً في تشكيلة ثلاث درجات و524 راكباً في تشكيلة درجتين بالنسبة لطائرات بوينغ 400-747).

دخلت الشركتان في تنافس حامي الوطيس، فخلال الفترة بين 2001 و2015 سلمت بوينغ 6.803 طائرات بينما أنتجت إيرباص 6.133 طائرة نفاثة، لتبقى هنالك طلبيات متراكمة لدى

كلتا الشركتين ولعدة سنوات لتوريد طلبيات متزايدة في أعدادها لاسيما من آسيا. كما أبرمت كلتا الشركتين الكثير من الاتفاقات التعاونية مع مصممي الطائرات والمحركات وكذلك مع موردي المكونات الأساسية للطائرات في أوروبا وأمريكا الشمالية وآسيا، حيث تواجه كلتا الشركتين تنافساً من القطاعات الأدنى. فها هي الشركة الكندية بومباردير والبرازيلية إمبراير تزيد من طائراتها النفاثة المكوكية: حيث تتسع بومباردير CRJ-أ900 لـ 86 راكباً، بينما تتسع إمبراير EMB-أ195 لـ 122 راكباً، وكلتا الشركتين، إلى جانب الشركة الروسية سوخوي سوبر جت وشركة الطائرات التجارية الصينية، والشركة اليابانية ميتسوبيشي، تدخل سوقاً سخياً للطائرات ذات الجسم الضيق التي توافرها اليوم بوينغ 737 وإيرباص A319/أ320.

المعلومات والتواصل

عملت المجتمعات القائمة على الوقود الأحفوري منذ نشأتها على إنتاج كم هائل من المعلومات وتخزينها وتوزيعها واستخدامها بشكل يزيد عن المجتمعات التي سبقتها. ففي شرق آسيا وفي أوروبا الحديثة خلال مطلع عهدها، كانت الطباعة نشاطاً تجارياً راسخاً منذ مئات السنين قبل إدخال الوقود الأحفوري، إلا أن عملية صف الحروف اليدوية كانت مرهقةً، وكان عدد النسخ المطبوعة محكوماً ببطء المطابع اللولبية الخشبية التي تعمل يدوياً. لتأتي بعد ذلك الأطر الحديدية التي سرعت العمل، لكن حتى التصاميم المتطورة لمطابع جوتنبيرغ لم تستطع طباعة أكثر من 240 نسخة في الساعة (جونسون 1972). وأول طابعة تعمل بالمحرك البخاري - التي صممها فريدريك كونيج Friedrich Koenig وأندرياس فريدريك باور Andreas Friedrich Bauer وبيعت إلى مجلة «التايمز» عام 1814، كانت تنتج 1.100 نسخة في الساعة. وبحلول عام 1827 وصل هذا الرقم إلى 5.000 نسخة، في حين تمكنت أول طابعة دوارة خلال أربعينيات القرن التاسع عشر من إنتاج 8.000 نسخة في الساعة؛ ليرتفع الرقم بعد عقدين من الزمن إلى 25.000 (كاوفر Kaufer وكارلي Carley أ1993).

باتت الإصدارات الضخمة للصحف الرخيصة حقيقة يومية، وذلك بعد أن أصبحت الأخبار تنتقل بسرعة أكبر بفضل البرق (التلغراف) (الذي دخل الحيز التجاري لأول مرة عام 1838)، وعبر الهاتف بعد أقل من جيلين (1876)، وقبل نهاية القرن ظهرت طريقتان جديدتان للتواصل والمعلومات في الميدان التجاري: التسجيلات الصوتية وإعادة الاستماع والأفلام. فباستثناء الطباعة، تم تطوير هذه التقنيات كافة خلال عصر الطاقة العالية اعتماداً على الوقود الأحفوري. وباستثناء التصوير وأوائل أجهزة الفونوغراف، لم يعمل أي منها من دون الطاقة الكهربائية، وباستثناء المادة المطبوعة، أخذ نجمها يأفل نظراً لأن الكثير من الصيغ الإلكترونية باتت تحل محلها، حيث تشهد هذه التقنيات كافة اتساعاً في قاعدة مستخدميها وتكتسب نماذج جديدة على مستوى حيازة المعلومات وتخزينها وتسجيلها ورؤيتها والمشاركة بها في عالم يعيش حالة التواصل الآني.

وقد أمسى التواصل الموثوق منخفض التكاليف المعولم بحق ممكناً فقط في ظل توافر الكهرباء. فقد هيمنت الرسائل السلكية على القرن الأول من تطور ذلك التواصل. واختتمت عقود من التجارب في شتى البلدان مع أول تلغراف عملي عرضه وليم كوك William Cooke وتشارلز ويتستون Charles Wheatstone عام 1837 (باورز 2001)، حيث اعتمد نجاحه على مصدر كهرباء موثوق، استمد من بطارية أليساندرو فولطا، وصمم عام 1800. أما بواكير التطورات الأبرز فتمثلت في اعتماد نظام تشفير صموئيل مورس Samuel Morse عام 1838 والتوسع السريع في الخطوط الأرضية المتصلة مع الخطوط الحديدية. واجتمعت الروابط تحت البحر (عبر القناة الإنجليزية عام 1851، وعبر الأطلسي عام 1866) وثروة الابتكارات التقنية (بما في ذلك بعض من باكورة ابتكارات أديسون) لتجعل من التلغراف عالمياً خلال جيلين فقط. وبحلول عام 1900 حملت الأسلاك متعددة الإرسال ذات التشفير الآلي ملايين الكلمات كل يوم، حيث تراوحت الرسائل من شفرات شخصية إلى دبلوماسية، واشتملت على حزم من عروض أسعار سوق البورصة وطلبات الأعمال.

أما الهاتف، الذي تعود براءة اختراعه إلى ألكساندر جراهام بل Alexander Graham Bell عام 1876 قبيل ساعات من تقديم إليشا جراي Elisha Grey لطلبه المستقل (هاونزهيل Hounshell أ1981)، فقد لاقى قبولاً أسرع في الخدمة المحلية والإقليمية (ميرسير Mercer أ2006). وأدخلت شبكات المسافات البعيدة التي اتسمت بموثوقيتها ورخص تكاليفها ببطء نوعاً ما. ولم تظهر أول شبكة عبر أمريكا إلا عام 1951، بينما لم يمُدّ كابل الهاتف عبر الأطلسي إلا عام 1956. وبطبيعة الحال، كانت شبكات الهاتف اللاسلكي متوافرة منذ أواخر عشرينيات القرن الماضي، إلا أنها لم تكن رخيصة ولا حتى موثوقة. وقد وفرت الاحتكارات الهائلة المتعلقة بالهاتف خدمة يسيرة التكلفة وموثوقة، إلا أنها لم تكن على قدر كبير من الابتكار: فالهاتف الكلاسيكي الأسود ذو القرص كان قد أدخل في مطلع عشرينيات القرن الماضي، ليبقى الخيار الوحيد للعقود الأربعة التالية، في حين لم تظهر أولى الهواتف الإلكترونية ذات الأزرار في الولايات المتحدة إلا عام 1963.

شهدت تقنيات تخزين الصوت والصور وإعادة إنتاجها ونقلها تطورات تزامنت مع تطورات الاتصالات الهاتفية. إذ كان فونوغراف توماس أديسون عام 1877 آلة بسيطة تعمل باليد، أما فونوغراف إيميل بيرلينر (1851-1929) المعقد فيعود إلى عام 1888 (جروناو Gronow وساونيو Saunio أ1999). وظهرت المسجلة الكهربائية خلال عشرينيات القرن الماضي. أما صناعة الصورة فقد شهدت تطوراً أبطأ منذ بداياتها الفرنسية، حيث كانت الأبرز في أعمال ج. ن. نيبس ول. ج. م. داجور خلال عشرينيات وثلاثينيات القرن التاسع عشر (نيوهول Newhall أ1982؛ روزنبلوم Rosenblum أ1997). وظهرت أول كاميرا صندوقية الشكل من كوداك عام 1888، لتتسارع التطورات بعد عام 1890 مع التقدم الباهر للتصوير السينمائي: فقد تم عرض أول أفلام قصيرة للأخوين لومير بطريقة الإسقاط عام 1895، لتأتي بعدها الأفلام بتقنية الصوت في أواخر عشرينيات القرن الماضي (أول فلم مصور كان «مغني الجاز» عام 1927)، بينما عرض أول فيلم روائي ملون مصور (بعد سنوات من الأفلام الملونة القصيرة) عام 1935، ليظهر بعد عامين اختراع تشيستر كارلسون (1906-1968) للتصوير الجاف (أوين 2004).

بدأ السعي نحو البث اللاسلكي من خلال توليد هاينريخ هرتز Heinrich Hertz أ(1857-1894) لموجات كهرطيسية عام 1887 والتي سبقه فيها جايمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell أ(1831-1879) من خلال صيغة نظرية الإشعاع الكهرطيسي (ماكسويل 1865؛ الشكل 6-14). وكان التطور العملي اللاحق سريعاً. فبحلول عام 1899 عبرت إشارات جوجليلمو ماركوني Guglielmo Marconi أ(1874-1937) القناة الإنجليزية، لتعبر الأطلسي بعد عامين من ذلك (هونج 2001). وفي عام 1897 اخترع فرديناند براون (1850-1918) أنبوب الأشعة المهبطية، الجهاز الذي مكن من إنتاج الكاميرات والمستقبلات التلفزيونية. وفي عام 1906 بنى لي دي فوريست (1873-1961) أول صمام ثلاثي المسارات الذي بقي أساساً في البث والاتصالات الهاتفية للمسافات الطويلة والحواسب إلى أن اخترع الترانزستور.

بدأ البث الإذاعي المنتظم عام 1920. وقدمت هيئة الإذاعة البريطانية BBC أول خدمة تلفزيونية مجدولة عام 1936، لتأتي من بعدها هيئة الإذاعة الأمريكية RCA عام 1939 (هورديمان Huurdeman أ2003). أما الآلات الحاسبة الميكانيكية - التي بدأت بتصاميم متبصرة من قبل تشارلز باباج Charles Babbage وإدوارد شويتز Edward Scheutz بعد 1920 (ليندجرين Lindgren أ1990؛ سوايد Swade أ1991) لتتوج في تأسيس IBM عام 1911 - فقد نحيت جانباً مع تطور الحواسب الإلكترونية الأولى خلال الحرب العالمية الثانية. إلا أن هذه الآلات - British Mark وU.S. Harvard Mark أ1و ENIAC - كانت أجهزة فريدة من نوعها وضخمة (بحجم الغرفة لاحتوائها على آلاف الصمامات الزجاجية المفرغة من الهواء) ولم يكن هناك أدنى توقعات لاستخدامها تجارياً في القريب العاجل.

إن هذا التسلسل المثير للإعجاب للتقنيات الجديدة وتلك التي شهدت تطورات بالغة قد طغت عليه تطورات ما بعد الحرب العالمية الثانية. أما القاعدة المشتركة لها فكانت في ظهور إلكترونيات الحالة الصلبة، التي بدأت مع الاختراع الأمريكي للترانزستور، ذلك الجهاز المنمنم لأشباه الموصلات ذات الحالة الصلبة، والذي يكافئ أنبوباً مفرغاً من الهواء بإمكانه تضخيم الإشارات الإلكترونية وتحويلها. وقدم يوليوس إدجار ليلينفيلد Julius Edgar Lilienfeld طلبه للحصول على براءة اختراع لترانزستور التأثير الحقلي في كندا عام 1925 وبعد عام في الولايات المتحدة (ليلينفليد Lilienfeld أ1930)؛ حيث يلخص طلب الحصول على براءة الاختراع بوضوح طريقة التحكم في تدفق التيار وتضخيمه بين نهايتي مادة موصلة صلبة.

إلا أن ليلينفليد لم يحاول صناعة أي جهاز، حيث تحقق أول نجاح تجريبي على يد اثنين من باحثي مختبرات بل، واتلر براتاين Walter Brattain وجون باردين



الشكل 14-6

لوحة منقوشة لجايمس كلارك ماكسويل اعتماداً على صورة التقطها فيرجوس (Corbis). وقد فتحت صياغة ماكسويل للنظرية الكهرطيسية الطريق أمام العالم الإلكتروني الذي لا ينفك يُستثمر حتى يومنا هذا، عالم أعطى إمكانية الاتصالات السريعة والتواصل عبر العالم بطريقة آنية غير مكلفة: لا شك أن العالم الإلكتروني للقرن الحادي والعشرين يرتكز على رؤى ماكسويل.

John Bardeen، بتاريخ 16 ديسمبر/كانون الأول 1947، باستخدام بلورات الجرمانيوم (باردين وبراتاين 1950). لكن جاء في اعتراف موقع «ذاكرة نظام بل»: «من الواضح تماماً أن مختبرات بل لم تخترع الترانزستور، بل أعادت اختراعه» في الوقت الذي أخفقت فيه بالاعتراف بالدور العظيم للأبحاث الرائدة والتصميم المنفذ منذ أول عقد للقرن العشرين (ذاكرة نظام بل 2011). على أي حال، لم يكن جهاز التواصل النقطي الخام المستخدم من قبل براتاين وباردين هو الأكثر فائدة، بل ترانزستور التأثير الحقلي الذي نال وليم شوكلي William Shockley أ(1910-1989) براءة اختراعه عام 1951 والذي تسبب في تغيير وجه الحوسبة الإلكترونية. وفي العام عينه، نجح جوردون ك. تيل Gordon K. Teal وإرنست بويلر Ernest Buehler في صناعة بلورات سيليكون أكبر حجماً والاضطلاع بدور ريادي في الطرائق المطورة لسحب البلورات وتنشيط السيليكون (شوكلي 1964؛ سميل 2006).

في عام 1948 حدث تطور نظري بالغ الأهمية حين فتح كلود شانون الباب أمام التقييمات الكمية لتكاليف الطاقة المستخدمة في الاتصالات (شانون Shannon أ1948). فرغم التطور المدهش خلال السنوات السابقة (زيادة بمقدار ثلاث قيم أسية في نقل المحادثة المتزامنة باستخدام كابل واحد، لا يتجاوز ثخانته اليوم قطر شعرة إنسان)، أشارت الحدود النظرية لشانون إلى إمكانية تحسين الأداء بمقدار العديد من القيم الأسية. إلا أنه لم يكن هنالك اندفاع مباشر ما بعد الحرب العالمية الثانية لطرح الحوسبة الإلكترونية تجارياً، ليتم بيع أول جهاز UNIVAC (حاسب آلي شامل، تطور عن حاسب إيكيرت- ماوكلي ENIAC) إلى مكتب الإحصاء الأمريكي عام 1951.

وبدأت الأجهزة الجديدة القابلة للبرمجة تشهد زيادة في سرعتها على نحو أسي بعد أن حلت الترانزستورات محل الأنابيب المفرغة من الهواء. وأقلع استخدام الحواسب في قطاع الأعمال داخل الولايات المتحدة الأمريكية أخيراً خلال أواخر خمسينيات القرن الماضي، حيث كانت شركة فاير تشايلد لأشباه الموصلات Fairchild Semiconductor و«أدوات تكساس» (التي سوقت أول ترانزستور سيليكون عام 1954) وIBM الشركات الأفضل على مستوى تطوير الأجهزة الثابتة والبرمجيات (سيروتزي Ceruzzi أ2003؛ وليكوير Lécuyer وبروك Brock أ2010). وخلال الفترة ما بين 1958-1959 تمكن جاك س. كيلبي Jack S. Kilby أ(1923-2005) في أدوات تكساس وروبرت نويس Robert Noyce أ(1927-1990) في شركة فاير تشايلد لأشباه الموصلات بشكل مستقل من اختراع دارات صغرى مدمجة في جسم المادة شبه الموصلة (نويس 1961؛ كيلبي 1964). وافتتح تصميم نويس للترانزستور المستوي عهداً جديداً لإلكترونيات الحالة الصلبة (المربع 6-8).

كان الجيش الأمريكي أول زبائن الدارات المدمجة. ففي عام 1965 عندما تضاعف عدد الترانزستورات على الرقاقات الإلكترونية الصغيرة إلى 64 بدلاً من 32 خلال العام السابق، تنبأ جوردون مور Gordon Moore باستمرارية هذا التضاعف (مور Moore أ1965). وفي عام 1975 خفض وتيرة التضاعف إلى مرة كل سنتين (مور 1975)، حيث ثبتت صحة قانونه الذي يعرف بين العامة اليوم باسم قانون مور منذ تلك الفترة (الشكل 6-12). وكان أول منتج تجاري خاضع لتحكم المعالج الدقيق هو عبارة عن آلة حاسبة قابلة للبرمجة من إنتاج شركة يابانية

صغيرة تعرف باسم بوسيكوم. فقد صممت مجموعتها المؤلفة من أربع رقاقات من قبل شركة إنتل التي أسست للتو في 1969-1970 (أوجارتن Augarten أ1984). وباعت بوسيكوم بضعة نماذج من الحاسبات الضخمة التي استخدمت فيها مجموعة رقاقات MCS-أ4 قبل أن تفلس الشركة عام 1974. وبالصدفة، كانت إنتل تمتلك الرؤية التي جعلتها تشتري حقوق المعالج قبل أن يحدث ذلك، حيث أصدرت أول معالج دقيق شامل على مستوى العالم 3 مم أ×أ 4 مم إنتل 4004 الذي يحتوي على 2.250 ترانزستور شبه موصل معدن-أكسيد بسعر 200 دولار أمريكي بتاريخ نوفمبر/تشرين الثاني 1971. وبمعدل 60.000 عملية في الثانية، كان المكافئ الوظيفي لـ ENIAC الذي كان حجمه حجم غرفة في عام 1945 (إنتل Intel أ2015).

أحدث الانتشار العالمي لهذه المعالجات الدقيقة التي تشهد زيادة مطردة في قوتها والتي ترافقت مع أجهزة الذاكرة ذات السعات المتزايدة أيضاً تأثيراً طال كل قطاعات التصنيع والنقل والخدمات والتواصل الحديثة، حيث صاحب هذا النمو المميز لتلك السعات انخفاض مستمر في تكاليفها وتحسن في موثوقيتها (وليمز 1997؛ سيروتزي 2003؛ سميل 2013ج؛ إنتل 2015). وباتت الرقائق الدقيقة أكثر الأجهزة تعقيداً والتي تشاهد في كل مكان للحضارة الحديثة: إذ ينتج ما يزيد على 200 بليون قطعة منها كل عام، وهي موجودة في منتجات تتراوح من أدوات وتجهيزات منزلية بسيطة (منظمات الحرارة، والأفران، والمواقد وفي كل جهاز إلكتروني) إلى التصنيع الآلي للمجموعات

المربع 6-8

اختراع الدارات المتكاملة

حين كان روبرت نويس مديراً للأبحاث في مؤسسة فايرتشايلد لأشباه الموصلات في سانتا كلارا، كاليفورنيا، كتب في مدونته الخاصة بالمختبر:

حبذا لو استطعنا إنتاج أجهزة متعددة على قطعة سيليكون واحدة، وذلك لإجراء ترابطات بين الأجهزة كجزء من عملية التصنيع، وبالتالي تخفيض حجم العنصر النشط ووزنه وما إلى ذلك، إضافة إلى خفض التكلفة (رايد 2001، 13)

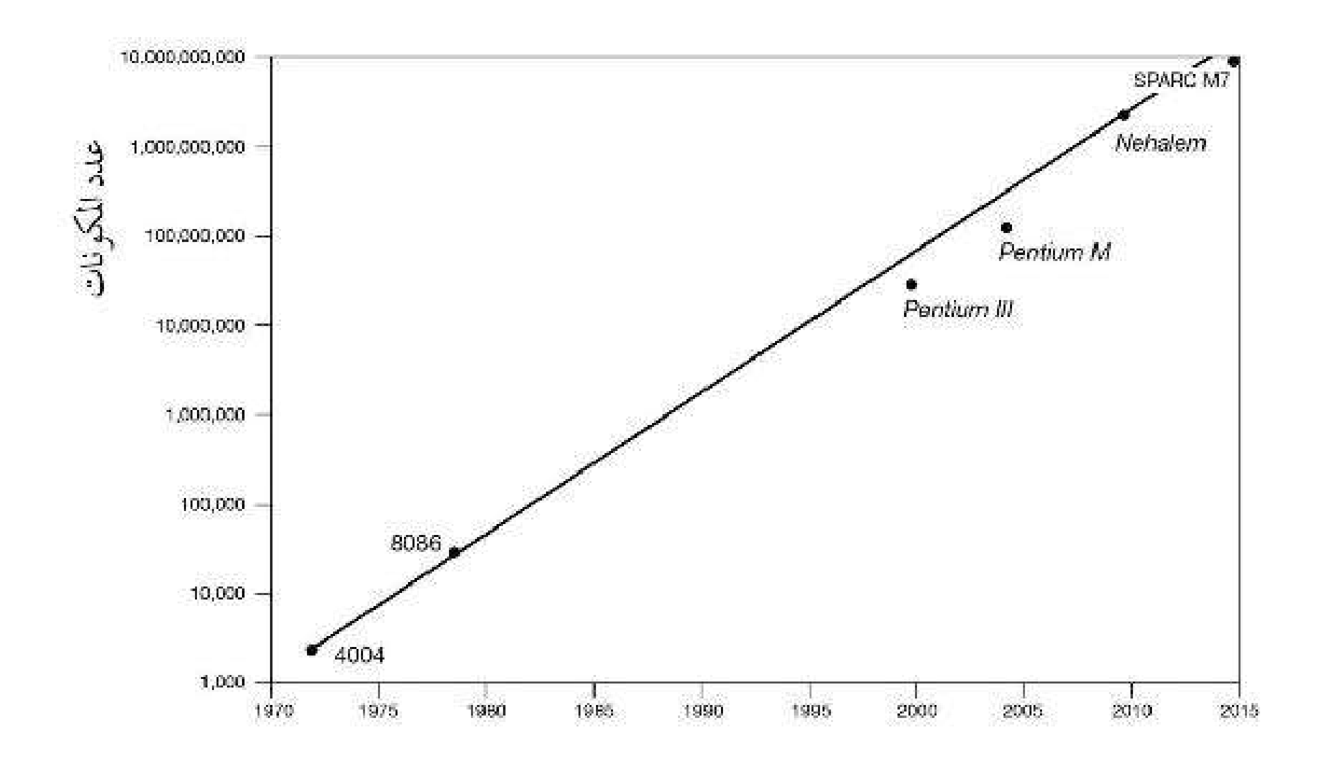
وأظهر تطبيق نويس لعام 1959 الخاص بـ «بنية الجهاز والأسلاك نصف الناقلة» دارة متكاملة مستوية

إذ حدد خلاله الوصلات المقعرة التي تمتد إلى سطح الجسم الخارجي للمادة شبه الموصلة، وطبقة سطحية عازلة تتألف بشكل أساسي من الأكسيد شبه الموصل عينه الذي يمتد عبر الوصلات، وأسلاك على شكل خطوط مفرغة من الهواء أو معدنية تمتد وتلتصق بطبقة الأكسيد العازلة لعمل

وصلات كهربائية إلى شتى مناطق الجسم شبه الموصل وبينها من دون تقصير دارة الوصلات.
(نويس 1961، 1).

منح نويس براءة اختراع (الولايات المتحدة، 2.981.877) في أبريل/نيسان 1961، وكيلبي (الولايات المتحدة 3.138.743)، حيث لم تُحل الإجراءات القضائية والدعاوى والاستئناف سوى عام 1971 عندما حكمت المحكمة العليا لمصلحة نويس. وفي تلك الفترة كان ذلك نجاحاً غير مادي لأنه لو عدنا إلى صيف عام 1966 لوجدنا أن كلتا الشركتين اتفقتا على مشاركة تراخيص الإنتاج الخاصة بهما والطلب من مصنعين آخرين اعتماد ترتيبات منفصلة مع كليهما. من حيث المبدأ، كانت أفكار كيلبي ونويس متطابقة، إلا أن نويس توفي بأزمة قلبية عام 1990، بينما عُمّر كيلبي بما يكفي لمشاركته الفوز بجائزة نوبل للفيزياء عام 2000 «لدوره في اختراع الدارة المدمجة».

المعقدة، بما في ذلك تصميم وتصنيع المعالجات الدقيقة نفسها. فهي التي تضبط توقيت إشعال الوقود في محركات السيارات وتحسن تشغيل توربينات الطائرات



الشكل 15-6

قانون مور وتطبيقه عملياً. كان لأول رقاقة صغيرة متوافرة تجارياً (إنتل 4004) 2.250 ترانزستور شبه موصلة من أكسيد المعدن، بينما كان لأحدث التصاميم ما يزيد على عشرة بليونات مكون، أي بزيادة ست قيم أسية. المخطط مقتبس من بيانات سميل (2006) وإنتل (2015).

النفاثة، وتوجه الصواريخ لوضع الأقمار الاصطناعية على مساراتها المحددة مسبقاً.

إلا أن أكبر تأثير اكتسب صفة الشخصية للمعالجات الدقيقة كان من خلال ملكية الشعب لأجهزة إلكترونية محمولة، وعلى رأسها الهواتف المحمولة. وسبق هذا التطور ظهور الحواسب الشخصية، والتطور المديد والمدهش للشبكة العنكبوتية (الإنترنت)، والذي سبقته فترة اعتماد الهواتف النقالة التي اتسمت ببطئها نسبياً. فقد اخترع مركز أبحاث زيروكس بالو ألتو (PARC) الحواسب الشخصية خلال سبعينيات القرن الماضي من خلال جمع قوة المعالجة التي تتسم بها الرقائق الدقيقة مع فأرة، وواجهة مستخدم ذات رسومات، وأيقونات، وقوائم منبثقة، وطباعة ليزرية، وتحرير للنصوص، وتدقيق إملائي، فضلاً عن الوصول إلى مخدمات الملفات والطابعات بعمليات لا تتعدى التحديد والنقر (سميل 2006؛ الشكل 6-16). فلولا هذه التطورات لما تمكن ستيفن وزنياك وستيف جوبس من إدخال أول حاسب شخصي تجاري ناجح، آبل II ذي الصور الملونة عام 1977 (مورتيز 1984). وأطلق الحاسب الشخصي IBM عام 1981، لترتفع بذلك ملكية الحواسب الشخصية في الولايات المتحدة من مليوني وحدة عام 1983 إلى قرابة 54 مليون وحدة عام 1990 (ستروس 1996). إلا أن الحواسب المحمولة والحواسب اللوحية الخفيفة لم تصل إلى مرحلة النضج إلا في أواخر تسعينيات القرن المنصرم، حين عُرض iPad من شركة آبل عام 2010.

جاء اقتراح التواصل باستخدام الحواسب لأول مرة عام 1962 من جانب ج. س. ر. ليكليدر J.C.R. Licklider، وهو أول طبيب لدى هيئة المشاريع البحثية المتقدمة في البنتاغون، وبدأ عام 1969 مع ARPANET المحدودة بأربعة مواقع فقط: معهد ستانفورد للأبحاث، والكلية الجامعية في لوس أنجليس UCLA، وجامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا UCSB، وجامعة يوتاه. وفي عام 1972 صمم راي توملينسون Ray Tomlinson من شركة BBN للعلوم التقنية برامج لإرسال الرسائل إلى حواسب أخرى واختيار الرمز @ كرمز محدد لموقع عناوين البريد الإلكتروني (توملينسون 2002). وفي عام 1983 حولت أربانت ARPANET أحد البروتوكولات لكي يتيح إمكانية التواصل عبر نظام للشبكات، وبحلول عام 1989، العام الذي أوقفت فيه عملها، كان لديها ما يزيد على 100.000 مضيف. وبعد عام من ذلك أوجد تيم بيرنرز- لي Tim Berners - Lee الشبكة العنكبوتية العالمية القائمة على النص التشعبي في CERN بجنيف وذلك لتنظيم المعلومات العلمية على الشبكة (أبات Abbate أ1999). لم يكن تصفح الشبكة سهلاً في أوائل عهدها، إلا أن الوضع سرعان ما تغير مع إدخال متصفحات عالية الكفاءة بدءاً من نتسكايب Netscape عام 1993.

أما أول التطورات الإلكترونية الرئيسة في الاتصالات الهاتفية فكان في إمكانية إجراء اتصالات زهيدة التكاليف عبر القارات، وذلك بفضل النداء الآلي عن طريق أقمار اصطناعية ثابتة بالنسبة للأرض. وجاء هذا الابتكار نتيجة توليفة من التطورات



الشكل 6-16

الحاسب المكتبي زيروكس ألتو مفيد وثوري في آن واحد، اعتمد عام 1973 وكان أول تجسيد شبه كامل للملامح الأساسية التي باتت عليها الحواسب الشخصية كافة التي ظهرت لاحقاً (الصورة من ويكيميديا).

الإلكترونية الدقيقة وأجهزة إطلاق الصواريخ الجبارة خلال ستينيات القرن الفائت، ومع تراجع التكاليف الأساسية، باتت الاتصالات أرخص. إلا أن أول تغير جذري في الاتصالات الهاتفية لم يبصر النور سوى مع إدخال الهواتف الجوالة (الخليوية)، فبعد أن عُرضت أول خدمة باهظة التكلفة مع مجموعات هواتف موتورولا ذات الحجم الضخم عام 1973، أضحت متاحة في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1983، إلا أنها لم تنتشر بسرعة إلا في أواخر تسعينيات القرن الفائت، حيث حلت اليابان والاتحاد الأوروبي قبل الولايات المتحدة الأمريكية في هذا الميدان. وتجاوزت مبيعات الهواتف الخليوية على المستوى العالمي 100 مليون وحدة عام 1997، وهو العام الذي عرضت فيه شركة إريكسون الهاتف الذكي الأول.

وصلت مبيعات الهواتف الخليوية إلى بليون وحدة بحلول عام 2009، ومع نهاية 2015 كان 7.9 بليون جهاز قيد الاستخدام، بينما وصل إجمالي الشحنات السنوية للأجهزة الجوالة، بما فيها الحواسب اللوحية وحواسب المذكرة notebooks والحواسب الصغيرة netbooks، إلى قرابة 2.2 بليون وحدة، كان من بينها 1.88 بليون جهاز خليوي (جارتنر Gartner أ2015؛ موبيفورج mobiForge أ2015). ولعل هذا النظام المبهر سريع التغير من أجهزة وبرمجيات التواصل والتسلية والمراقبة والبيانات يتطلب كماً هائلاً من الطاقة المطلوب توظيفها في أجهزة إلكترونية ذات استهلاك كثيف من الطاقة وتعتمد بشكل كامل على تغذية كهربائية متواصلة عالية الموثوقية لإيصال الطاقة إلى البنى التحتية الأساسية من مراكز البيانات إلى أبراج الاتصالات الخليوية (المربع 6-9).

وتجدر الإشارة بصفة خاصة إلى التطور الذي طرأ منذ ستينيات القرن الماضي على مستوى تصميم ونشر طيف واسع من تقنيات التشخيص والقياس والاستشعار عن بعد. فقد أعطت هذه التطورات كنزاً من المعلومات لم تكن تخطر في بال أحد. إن الأشعة السينية التي اكتشفها و. ك. رونتجن (1845-1923) عام 1895، كانت الخيار الوحيد عام 1900. وبحلول عام 2015 تراوحت هذه التقنيات من الأمواج فوق الصوتية (المستخدمة في التشخيص الطبي وكذلك في الهندسة) إلى التصوير عالي الدقة (التصوير بالرنين المغناطيسي MRI، والتصوير المقطعي المحوسب CT)، ومن الرادار (الذي طور عشية الحرب العالمية الثانية، ليصبح اليوم أداة لا يمكن الاستغناء عنها في النقل ومراقبة الطقس) إلى طيف واسع من المستشعرات المعتمدة على السواتل لاكتساب البيانات ضمن شتى الحزم الطيفية الكهرطيسية وبالتالي توفير مستوى إمكانية أفضل للتنبؤ بالطقس وإدارة الموارد الطبيعية.

المربع 6-9

الطاقة المتمثلة في الهواتف الخليوية والسيارات

إن وزن سيارة صغيرة يزيد بنحو 10.000 ضعف عن وزن هاتف ذكي (1.4 طن مقابل 140 غ)، وبالتالي فإنها تنطوي على كم أكبر بكثير من الطاقة. إلا أن فرق الطاقة أدنى بكثير من تفاوت الكتلة الذي يبلغ أربع قيم أسية، حيث تشكل إجمالي الحسابات مقارنة تبعث على الدهشة. فهاتف خليوي يمثل نحو 1 جيغا جول من الطاقة، بينما تتطلب سيارة ركاب نمطية نحو 100 جيغا جول لإنتاجها، أي ما يعادل كماً من الطاقة لا يزيد على 100 ضعف قياساً بالهاتف الخليوي. وفي عام 2015 اقتربت مبيعات الهواتف الخليوية على مستوى العالم من بليوني وحدة، وبالتالي استهلك إنتاجها نحو 2 إكسا جول من الطاقة (ما يكافئ نحو 48 مليون طن متري من النفط الخام). بينما بيع عام 2015 قرابة 72 مليون سيارة على مستوى العالم، حيث ترتب على إنتاجها نحو 7.2 إكسا جول - أي أكثر بأربع مرات وحسب من إجمالي ما تطلبته الهواتف الخليوية.

تتسم الهواتف الخليوية بقصر عمرها، حيث تعيش سنتين بالمتوسط، في حين يتطلب إنتاجها اليوم نحو 1 إكسا جول من الطاقة على المستوى العالمي لكل سنة استخدام. أما سيارات الركاب فتعيش في المتوسط ما لا يقل على عقد من الزمن، حيث ينطوي إنتاجها على نحو 0.72 إكسا جول على المستوى العالمي لكل سنة استخدام - أي أدنى بنسبة 30% قياساً بصناعة الهواتف الخليوية! ما يعني أنه حتى إن أخطأت هذه الأرقام الإجمالية التقريبية بالاتجاهات العكسية (أي أن السيارات تنطوي على استهلاك أكبر من الطاقة قياساً بالهواتف الخليوية) تبقى الأرقام الإجمالية مخالفة للقيمة الأسية لكن قريبة من بعضها على نحو مدهش، إذ ثمة تباين كبير بالتأكيد في تكاليف طاقة التشغيل. فجهاز الهاتف الخليوي لا يستهلك سنوياً إلا 4 ك واط ساعي من الكهرباء، أي أقل من 30 ميغا جول خلال فترة خدمته لسنتين، أو مجرد 3% من تكلفة الطاقة المدمجة. بالمقابل، ستستهلك سيارة صغيرة من الطاقة (كوقود بنزين أو ديزل) خلال فترة عمرها أربعة أو خمسة أضعاف محتواها المدمج. إلا أن تكاليف تغذية الشبكات العالمية للمعلومات والتواصل بالكهرباء تشهد ارتفاعاً، إذ تطلبت قرابة 5% من إجمالي الطاقة الكهربائية التي تم توليدها على مستوى العالم عام 2012، بينما ستقترب من 10% بحلول عام 2020 (لانـّوو Lannoo أ2013).

النمو الاقتصادي

الحديث عن الطاقة والاقتصاد يبقى محض حشو: فكل نشاط اقتصادي ليس سوى تحويل من إحدى أشكال الطاقة إلى آخر، بينما تبقى الأموال مجرد وسيلة مناسبة (وغير تمثيلية إلى حد ما في أغلب الأحيان) لتقييم تدفقات الطاقة. ولا غرو إن وجدنا فريدريك سودي، الحائز جائزة نوبل بالفيزياء والذي تناول هذا الاختصاص من المنظور المذكور يخبرنا بأن «تدفق الطاقة يجب أن يكون الاهتمام الأول لعلم الاقتصاد» (سودي Soddy أ1933، 56). وفي الوقت نفسه، يعد التدفق قياساً ضعيفاً للنشاط الفكري: إذ ينطوي التعليم بالتأكيد على كم هائل من الطاقة المنفقة على بنيته التحتية والموظفين العاملين فيه، إلا أن الأفكار المتألقة (المتعلقة مباشرة بمدى الالتزام بالمدرسة) لا تتطلب زيادات كبيرة في معدل الأيض الدماغي.

لعل هذه الحقيقة الواضحة تفسر الكثير بخصوص الفصل الذي تم مؤخراً بين نمو إجمالي الناتج المحلي والطلب العام على الطاقة، فنحن نعزو ارتفاع التكاليف النقدية إلى المساعي غير المادية التي تشكل اليوم النسبة الأكبر للمنتج الاقتصادي. على أي حال، كانت الطاقة محط اهتمام هامشي في الدراسات الاقتصادية الحديثة، إذ إن خبراء الاقتصاد الإيكولوجي هم فقط من وضعها في بؤرة دائرة التركيز (أيريس Ayres، أيريس Ayres، ووار Warr أ2003؛ ستيرن Stern أ2010). بينما انصب اهتمام غير متكافئ للعامة فيما يتعلق بالطاقة والاقتصاد على الأسعار بصفة عامة، وعلى أسعار الوقود الخام، أهم السلع المتداولة تجارياً على مستوى العالم، بصفة خاصة.

في الغرب، كان رفع أوبك لأسعار النفط مرتين خلال سبعينيات القرن الماضي - نتيجة الاستهلاك المفرط في الشرق الأوسط وتهديد الاستقرار في المنطقة - موضوع نقد على وجه الخصوص، فضلاً عن كونه المسؤول عن الاضطرابات الاقتصادية وتزعزع الاستقرار الاجتماعي. إلا أن ارتفاع الأسعار من جانب أوبك حمل تأثيراً مفيداً (ومستحقاً منذ فترة طويلة) طال كفاءة استهلاك الوقود المكرر لدى البلدان المستوردة لنفط أوبك. ففي عام 1973، وبعد أربعة عقود من التدهور البطيء، ارتفع معدل الاستهلاك النوعي لوقود سيارات الركاب الأمريكية الجديدة قياساً باستهلاكه في مطلع ثلاثينيات القرن الماضي، إذ بات 17.7 ل/100 كم مقابل 14.8 ل/100 كم، أو وفقاً للاستخدام الأمريكي 13.3 ميل للجالون مقابل 16 ميلاً للجالون (سميل 2006) - ما يشكل مثالاً نادراً حول انخفاض كفاءة التحول الحديث في الطاقة.

لقد أدى رفع أوبك لأسعار النفط إلى المضي باتجاه عكسي، فبين عامي 1973 و1987 انخفض معدل حاجة السيارات الجديدة للوقود في السوق الأمريكية الشمالية إلى النصف حين انخفض المستوى القياسي لمعدل كفاءة الاستخدام المشترك للوقود (CAFE) إلى 8.6 ل/100 كم (27.5 ميل للغالون). ولسوء الحظ، توقف تراجع أسعار النفط بعد 1985، ليشهد بعد ذلك تغيراً عكسياً في اتجاه تطور الكفاءة (مع إنتاج مزيد من سيارات الدفع الرباعي والشاحنات الصغيرة)، حيث لم تتم العودة إلى ترشيد استهلاكه إلا في عام 2005. كما حمل ارتفاع أسعار أوبك تأثيراً مفيداً طال الاقتصاد العالمي إذ خفض بشكل ملحوظ من معدل كثافة النفط (كمية النفط المستخدم في وحدة إجمالي الناتج المحلي). وتوقفت محطات الطاقة عن حرق أنواع الوقود السائل؛ واستعاض صناع الحديد عن حقن زيت الوقود في أفران الصهر بالفحم المسحوق؛ وباتت المحركات النفاثة أكفأ، وتحول كثير من الأعمال الصناعية إلى الغاز الطبيعي، لتظهر بالتالي نتائج باهرة حقاً. فبحلول عام 1985 انخفضت حاجة الاقتصاد الأمريكي إلى النفط بنسبة 37% لإنتاج دولار واحد من إجمالي الناتج المحلي قياساً بحاجته عام 1970؛ وبحلول عام 2000 كانت كثافة استهلاكه للنفط أقل بنسبة 53%؛ وفي عام 2014 احتاج الاقتصاد الأمريكي إلى كمية أقل من النفط الخام بنسبة 62% لإنتاج دولار واحد من إجمالي الناتج المحلي قياساً بحاجته عام 1970 (سميل 2015ج).

أما الحقيقة التي غابت عن الأذهان على نحو مريب فهي أن الحكومات الغربية كانت تجني أموالاً تفوق ما كانت تجنيه أوبك. ففي عام 2014 شكلت الضرائب في بلدان مجموعة السبع نحو 47% من سعر لتر النفط، قياساً بنحو 39% كانت تذهب للبلدان المنتجة، حيث بلغت النسب الوطنية

60/30 في المملكة المتحدة، و52/ 34 في ألمانيا، و15/ 61 في الولايات المتحدة (أوبك 2015). أضف إلى ذلك أنه لضمان الإمداد بمستوى آمن، انخرطت كثير من الحكومات (بما في ذلك حكومات اقتصاد السوق) في نسبة كبيرة من أعمال تنظيم الصناعة، بينما كانت الحكومات في كثير من البلدان المنتجة للنفط تشتري الدعم السياسي بمبالغ دعم ضخمة من أسعار الطاقة (GSI، أ2015). أما أوجه الدعم السعودي فبلغت ما يزيد على 20% من إجمالي النفقات الحكومية عام 2010، في حين أدى دعم الفحم في الصين إلى تثبيت الأسعار حتى عند مستويات أدنى من تكلفة الإنتاج.

أثار أصل النمو، ومعدله، واستمراره قلقاً كبيراً في الدراسات الاقتصادية الحديثة (كوزنتس Kuznets أ1971؛ روستو Rostow أ1971؛ بارو Barro أ1997؛ جالور Galor أ2005)، وبالتالي حظيت الزيادة في إجمالي الناتج الاقتصادي (إما إجمالي الناتج المحلي للاقتصادات الفردية أو إجمالي الناتج العالمي لدراسة الاتجاهات العالمية) بقدر كبير من الاهتمام (ستيرن Stern أ2004، 2010؛ المنتدى الاقتصادي العالمي 2012؛ أيرس 2014). أما الاقتصادات التقليدية السابقة للعصر الصناعي فاتسمت إما بدرجة كبيرة من الثبات أو بتمكنها من النمو ببضع نقاط مئوية كل عقد، كما شهد معدل استهلاك الفرد للطاقة وتيرة أبطأ: ثمة عدد لا بأس به من الشهادات الواردة من مطلع عقود القرن التاسع عشر تظهر أن الظروف المعيشية لبعض المجموعات الشديدة الفقر لم تكن شديدة الاختلاف عن تلك التي سادت قبل قرنين أو ثلاثة أو حتى أربعة.

بالمقابل، سجلت الاقتصادات القائمة على الوقود الأحفوري معدلات نمو غير مسبوقة، رغم تعديلها وفق الطبيعة الدورية للتوسع الاقتصادي (فان دويجن van Duijn أ1983؛ ECRI أ2015) وانقطاعها بفعل الصراعات الطاحنة الداخلية منها أو الخارجية. وشهدت المجتمعات التي اتخذت اتجاه التحول الصناعي خلال القرن التاسع عشر نمواً في اقتصادها بين 20-60% في عقد من الزمن. أما معدلات النمو هذه فتعني أن إنتاج الاقتصاد البريطاني عام 1900 كان أكبر بنحو 10 أضعاف قيمته عام 1800. وتضاعف إجمالي الناتج المحلي الأمريكي خلال 20 سنة فقط، وذلك بين عامي 1880 و1900، في حين حقق الإنتاج الياباني زيادة إبان عهد ميجي (1868-1912) بمقدار ضعفين ونصف ضعف. وتأثر النمو الاقتصادي خلال النصف الأول من القرن العشرين بالحربين العالميتين وكذلك بالأزمة الاقتصادية العظيمة خلال ثلاثينيات القرن الفائت، بينما لم يشهد الإنتاج والازدهار فترة نمو سريعة وواسعة النطاق مثلما شهدها خلال الفترة بين 1950 و1973.

شكل التراجع المطرد في الأسعار الحقيقية للنفط الخام خلال فترة ما قبل عام 1970 مكوناً أساسياً لاتساع استخدامه. وارتفع الناتج المحلي الإجمالي للفرد في أمريكا - الذي هو الأعلى أصلاً في العالم - بنسبة 60%، بينما ازدادت النسبة في ألمانيا الغربية بأكثر من ثلاثة أضعاف، مقابل ستة أضعاف سجلت في اليابان. كذلك دخل عدد من البلدان الفقيرة التي تعاني من كثافة سكانية كبيرة في آسيا وأمريكا اللاتينية مرحلة نمو اقتصادي راسخ. إلا أن أول موجة لرفع أسعار النفط من قبل أوبك (1973-1974) أوقفت هذا النمو مؤقتاً. وحدثت الموجة الثانية لارتفاع أسعار النفط عام

1979 إثر الإطاحة بشاه إيران وتسلم آية الله المتشدد مقاليد الحكم. أما تباطؤ الاقتصاد العالمي في مطلع ثمانينيات القرن الفائت فترافق مع مستوى تضخم قياسي وارتفاع البطالة، إلا أن استقرار أسعار النفط عند مستويات منخفضة خلال تسعينيات القرن نفسه دعم فترة أخرى من النمو استمرت حتى عام 2008 عندما شهد العالم أسوأ ركود اقتصادي بعد الحرب العالمية الثانية، ليتعافى جزئياً في أعقاب ذلك.

عرّف أيرس، وأيرس ووار (2003) تراجع سعر الأعمال النافعة على أنه محرك النمو في اقتصاد الولايات المتحدة خلال القرن العشرين، والعمل النافع يأتي حصيلة العمل الأعظمي لعملية تحويل الطاقة المثالية وكفاءة ذلك التحويل. فحالما تتم معايرة البيانات التاريخية للناتج الاقتصادي (والتي يعبر فيها عن قيم إجمالي الناتج المحلي بأموال ثابتة ومعدلة وفق التضخم وتستخدم فيها المنتجات الوطنية لحساب إجمالي الناتج العالمي من حيث تباين القدرة الشرائية بدلاً من استخدام أسعار الصرف الرسمية) ستظهر علاقات راسخة وطويلة الأجل مثيرة للاهتمام بين النمو الاقتصادي واستخدام الطاقة على المستويين العالمي والوطني.

وبين عامي 1900 و2000 شهد استخدام أنواع الطاقة الأولية كافة (بعد طرح خسائر التصنيع واستخدامات الوقود الأحفوري في غير الوقود) ارتفاعاً بنحو ثمانية أضعاف، وذلك من 44 إلى 382 إكسا جول، كما ارتفع إجمالي الناتج العالمي بأكثر من 18 ضعفاً، من نحو تريليونيْ دولار أمريكي إلى قرابة 37 تريليون دولاراً وفق القيمة الثابتة للعملة عام 1990 (سميل 2010أ؛ مشروع ماديسون 2013)، ما ينطوي على مرونة أقل من 0.5. كما يمكن إيجاد تلازم قوي بين المتغيرين بالنسبة إلى بلد واحد مع الوقت، إلا أن ثمة تبايناً في مستويات المرونة: فخلال القرن العشرين ارتفع إجمالي الناتج المحلي الياباني بمقدار 52 ضعفاً، بينما ارتفع إجمالي استخدام الطاقة بمعدل 50 ضعفاً (بمعنى أن مستوى المرونة يقترب كثيراً من 1.0)، بينما كانت مستويات المضاعفات في الولايات المتحدة على التوالي نحو 10 أضعاف و25 ضعفاً (بمرونة أقل من 0.4)، وفي الصين نحو 13 ضعفاً و20 ضعفاً (بمرونة 0.6).

ولعل ما أكد مستوى القرب المتوقع للرابطة بين المتغيرين هو التلازمات المرتفعة جداً (<0.9) بين معدلات إجمالي الناتج المحلي للفرد والإمداد بالطاقة عندما تشمل المجموعة بلدان العالم كافة. وهو ما يمثل بوضوح أحد الارتباطات المرتفعة على نحو غير عادي في طبيعة الشؤون الاجتماعية والاقتصادية التي عادة ما تتسم بصعوبة ضبطها، إلا أن هذا التأثير يضعف بشكل كبير حالما نقوم بدراسة مجموعات بمستوى تجانس أكبر داخل البلاد: فتحولك إلى شخص غني يتطلب زيادة كبيرة في استخدام الطاقة، إلا أن الزيادة النسبية في استهلاك الطاقة بين المجتمعات التي تنعم بالرخاء، سواء قيست وفق وحدة إجمالي الناتج المحلي أو الفرد، تظهر تبايناً واسعاً، وتعطي تلازمات متدنية جداً.

فعلى سبيل المثال، لدى إيطاليا وكوريا الجنوبية مستوى متقارب جداً من إجمالي الناتج المحلي للفرد - والذي بلغ بعد تعديله لمصلحة القدرة الشرائية نحو 35.000 دولار أمريكي عام 2014 - إلا أن استخدام الفرد للطاقة في كوريا الجنوبية أعلى بنحو 90% من نظيره في إيطاليا. بالمقابل، لدى ألمانيا واليابان مستوى شبه متطابق من الاستهلاك السنوي للطاقة، والذي يبلغ قرابة 170

جيغا جول/فرد، إلا أن إجمالي الناتج المحلي في ألمانيا ارتفع عن نظيره الياباني عام 2014 بنحو 25% (صندوق النقد الدولي 2015؛ الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2015د). أما الارتفاع في الاستهلاك المطلق للطاقة المطلوب لإنتاج كم أكبر من المنتجات الاقتصادية فيخفي تراجعاً نسبياً مهماً. فلدى الاقتصادات الناضجة ذات الدخل المرتفع والطاقة المرتفعة كثافة طاقة (أي الطاقة في وحدة إجمالي الناتج المحلي) أدنى بشكل ملحوظ من التي كانت لديها خلال مراحل تطورها (المربع 6-10، الشكل 6-17).

ولا شك في أن الدرس الأهم الذي تحمله دراسة الاتجاهات طويلة الأجل لاستخدام الفرد للطاقة والنمو الاقتصادي هو إمكانية بلوغ النسب ذات الصلة بالنمو الاقتصادي من خلال الانخفاض المطرد في استخدام الفرد للطاقة. ففي الولايات المتحدة نرى أن النمو السكاني المستمر والبطيء تسبب في زيادات أخرى في الاستهلاك المطلق للوقود والكهرباء، إلا أن معدل استخدام الفرد للطاقة الأولية شهد استقراراً (مع شيء من التقلبات الطفيفة) لفترة ثلاثة عقود، منذ منتصف ثمانينيات القرن الفائت، مع ذلك فإن إجمالي الناتج المحلي الحقيقي للفرد (وفق قيمة الدولار عام 2009 المعدلة بعد التضخم) ارتفع بنسبة 57% تقريباً، وذلك من 32.218 دولاراً عام 1985 إلى 50.456 دولاراً عام 2014 (دائرة اقتصادات الأغذية والموارد 2015). وبالمثل، شهد استخدام الفرد للطاقة الأولية في كل من فرنسا واليابان (التي يشهد فيهما عدد السكان تراجعاً اليوم) استقراراً منذ منتصف تسعينيات القرن الماضي، إلا أن معدل إجمالي الناتج المحلي للفرد ارتفع خلال العقدين اللاحقين بنحو 20% و10%.

وتوخياً للدقة عند تفسير هذه النتائج كون فترات الانفصال النسبي ما بين الطاقة وإجمالي الناتج المحلي تتصادف مع استعانة أمريكا وأوروبا واليابان في صناعاتها الثقيلة التي تتطلب استخداماً كثيفاً للطاقة بآسيا عموماً والصين خصوصاً فإن من السابق لأوانه الاستنتاج بأن التجربة الأخيرة لتلك الاقتصادات الرئيسة الثلاثة ليست سوى باكورة الاتجاه نحو ذلك الانفصال الواسع. وبسبب النمو الهائل للصين في التهافت على الطاقة خلال الفترة السابقة لعام 2014 (بعد أن حققت زيادة بنحو 4.5 أضعاف منذ تسعينيات القرن الفائت)، كان على الإمداد العالمي بالطاقة الأولية أن يرتفع بنسبة 60% تقريباً كي يتمكن من زيادة الإنتاج بنحو ضعفين وثمانية أعشار في إجمالي الناتج العالمي خلال فترة الـ 25 سنة بعد عام 1990 (مستوى المرونة 0.56). أضف إلى ذلك أن التراجع في كثافة الكهرباء كان أبطأ قياساً بالتراجعات في إجمالي كثافة الطاقة. وبين 1990 و2015 كان الانخفاض العالمي أقل من 20% (قياساً بنسبة >40% لأنواع الطاقة كافة)، كما بلغ التراجع في الولايات المتحدة 20% أيضاً، بينما لم تشهد الصين التي تتخذ منحى تحديث سريع أي تراجع بين عامي 1990 و2015.

تشهد كثافة الطاقة الأولية (والكهرباء) المستخدمة في النمو الاقتصادي العالمي تراجعاً، لكن، نظراً لحجم الاقتصاد العالمي واستمرارية النمو السكاني في كل من آسيا وأفريقيا، ستكرر العقود القادمة، بشكل أو بآخر، التجربة السابقة، حيث ستكون كميات الوقود الكبيرة والإضافات الهائلة على سعات توليد الكهرباء مطلوبة لإمداد النمو الاقتصادي بالطاقة في البلدان التي تسلك طريقها نحو التحديث. من الواضح أن الانطلاقة نحو نمو اقتصادي قوي والمحافظة عليه مسألة مدخلات معقدة

ومترابطة. فهي تتطلب تحسينات فنية وإجراءات مؤسسية مستجيبة، والأهم من هذا وذاك توافر نظم مصرفية وقانونية سديدة. كذلك تعد السياسات الحكومية الملائمة والنظم التعليمية الجيدة، ومستوى التنافسية الكبير جوانب أساسية أيضاً. لكن إن كان على بلدان الدخل المنخفض أن تنتقل اليوم من الفقر إلى أولى مراحل الرخاء (مكررة بذلك الاتجاه الاقتصادي للصين ما بعد عام 1990)، فإن أياً من هذه العوامل لن يكون قادراً على تحقيق التغيير من دون الارتفاع في استهلاك الوقود

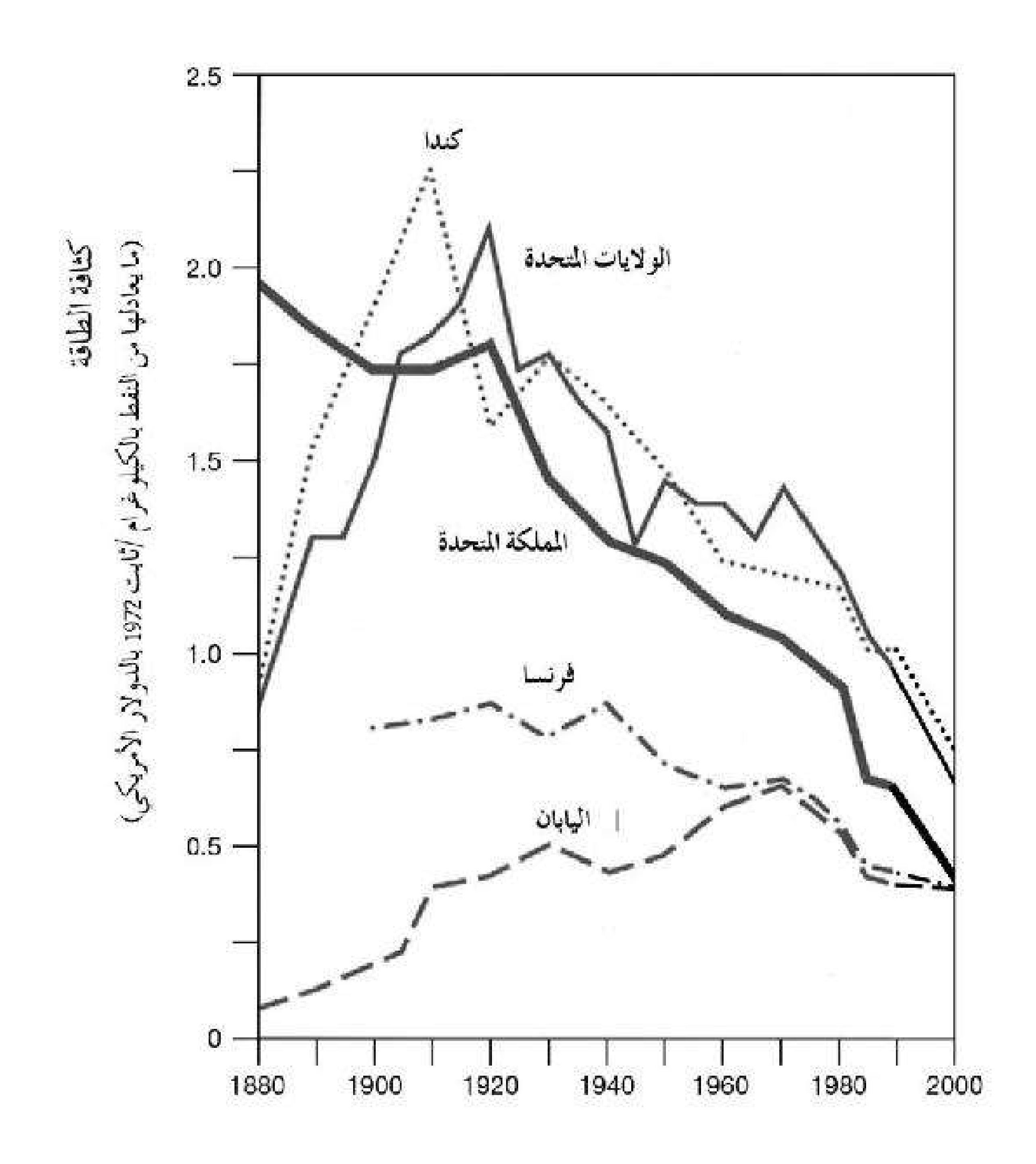
المربع 10-6

تراجع كثافة الطاقة المطلوبة للنمو الاقتصادي

تظهر الإحصائيات التاريخية تراجعاً ثابتاً في كثافة الطاقة البريطانية عقب الارتفاع السريع الذي جاء به اعتماد المحركات البخارية والسكك الحديدية بين عامي 1830 و1850 (همفري Humphrey وستانيسلو Stanislaw أ1979). كما اتبعت كثافات استخدام الطاقة الكندية والأمريكية الاتجاه البريطاني المتراجع بعد 60-70 عاماً. ووصل المعدل الأمريكي إلى ذروته قبل عام 1920، بينما سُجلت القيمة العظمى الصينية في أواخر سبعينيات القرن الماضي، في حين لم تبدأ كثافة الطاقة الهندية بالتراجع إلا في القرن العشرين (سميل 2003). وبين عامي 1955 و1973 استقرت كثافة الطاقة في الولايات المتحدة (بتقلبات لا تتعدى ±2%)، في حين سجل إجمالي الناتج المحلي الحقيقي نمواً بمقدار الضعفين والنصف، ليعاود تراجعه ثانية، منخفضاً عام 2010 بنسبة 45% قياساً بمستوى عام 1980.

بالمقابل، شهدت كثافة الطاقة اليابانية ارتفاعاً لغاية 1970، إلا أنها تراجعت بين عامي 1980 و2010 بنسبة 25% (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2015د)، بينما كان التراجع الصيني كبيراً بصفة خاصة، حيث وصلت نسبته إلى قرابة 75% بين عامي 1980 و2013 (مجموعة الطاقة الصينية 2014)، ما يشكل انعكاساً لانخفاض مطرد في الكفاءات خلال مطلع الفترة التي أعقبت حكم ماو في الصين والتطورات على مسيرة التحديث منذ عام 1980. من ناحية أخرى، شهدت الهند، التي لا تزال تعيش مرحلة مبكرة من التنمية الاقتصادية، تراجعاً بنسبة 7% فقط بين عامي 1980 و2010. وتعود حالات التراجع المذكورة إلى مجموعة من عوامل عدة نذكر منها تراجع أهمية مدخلات رأس المال التي تتطلب طاقة كثيفة والتي وصفت بها المراحل الأولى للتنمية الاقتصادية، والتي ركزت بشكل كبير على البنى التحتية الأساس؛ وتحسن كفاءات التحول على مستوى استخدام محركات الاحتراق والكهرباء؛ وارتفاع نسبة مشاركة قطاع الخدمات (تجارة التجزئة، تعليم، معاملات مصرفية)، حيث تتطلب إضافة القيمة مستوى أقل من الطاقة في وحدة إجمالي الناتج المحلي قياساً بأنشطة الصناعات أو التصنيع الاستخراجية.

أما الفوارق الرئيسة الأخرى في ميدان الكثافات الوطنية للطاقة لدى الاقتصادات التي حققت إنجازات مماثلة فتفسر من خلال تركيبة استخدام الطاقة الأولية (فلا بد من إنتاج معادن كثيفة الطاقة)، وكفاءة التحولات النهائية (الطاقة الكهرمائية تتفوق دائماً على الفحم)، والمناخ ومساحة البلد (سميل 2003). فبينما بلغ المعدل النسبي للولايات المتحدة 100، سجلت المعدلات النسبية عام 2011 نحو 60 في اليابان وألمانيا، و70 في السويد، و150 في كندا، و340 في الصين. وما يثير الاهتمام أن كاوفمان Kaufmann أ(1992) بيّن أن جلّ حالات التراجع في كثافة الطاقة ما بعد عام 1950 في الاقتصادات المزدهرة نتجت عن التحولات في أنواع الطاقة المستخدمة وأنماط السلع والخدمات السائدة، ولم تأتِ نتيجة التطورات التقنية.



الشكل 17-6

كان تراجع كثافة الطاقة في إجمالي الناتج المحلي صفة عامة بين الاقتصادات الناضجة كافة. أعد المخطط اعتماداً على بيانات سميل 2003 والإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2015د.

والكهرباء: ففصل النمو الاقتصادي واستهلاك الطاقة خلال المراحل المبكرة للتنمية الاقتصادية الحديثة سيكون بمثابة تحدّ لقوانين الديناميكا الحرارية.

تبعات ومخاوف

تتراوح التبعات السلبية لاستخدام المجتمعات الحديثة لكمية زائدة من الطاقة بين نتائج بدنية واضحة وتغيرات تدريجية لا تظهر نتائجها السلبية إلا بعد أجيال. ففي الفئة الأولى تدفع إمدادات الغذاء الوفيرة إلى إسراف هائل في الأغذية وبلوغ معدلات غير مسبوقة من الوزن الزائد (مؤشر كتلة الجسم بين 25 و30) فضلاً عن السمنة (مؤشر كتلة الجسم >30). ولعل ما يعزز هذا الاتجاه نحو أجسام أثقل انخفاض نفقات الطاقة، وأنماط الحياة التي تعتمد على الجلوس طويلاً بفعل استبدال الآلات بالطاقة العضلية، واستخدام السيارات في كل مكان حتى في المسافات القصيرة التي اعتاد الناس سابقاً على القيام بها سيراً على الأقدام. وفي عام 2012، كان 69% في سكان الولايات المتحدة يعانون من زيادة الوزن أو السمنة، وهي نسبة أعلى من نسبة 33% التي سادت خلال خمسينيات القرن الفائت (مركز مكافحة الأمراض 2015)، ما يشكل دليلاً واضحاً على أن هذه الظروف قد اكتسبت من خلال توليفة الإفراط بتناول الطعام وتراجع النشاط البدني.

ليست الولايات المتحدة البلد الوحيد الذي تكثر فيه زيادة الوزن والسمنة بين السكان (إذ ثمة نسب أعلى في المملكة العربية السعودية، مع بعض أسرع حالات زيادة الوزن نجدها اليوم بين الأطفال الصينيين)، إلا أن هذا الاتجاه ليس عالمياً (بعد؟): فكثير من سكان أوروبا وجل سكان إقليم أفريقيا جنوب الصحراء لا يزالون يتمتعون بجسم مناسب. على أي حال، ليس القصد من وراء كتابتي في هذا المقام أن أقصر تركيزي على التأثيرات السلبية للاستخدام الكثيف للطاقة. فكلّ من التبعات العالمية الخمس الرئيسة لاستخدام الطاقة الحديثة التي أدرسها جاء بكثير من التحسينات الإيجابية إلى جانب تأثيرات مقلقة تطال مستويات تمتد من النطاق المحلي إلى العالمي.

لقد شكل استمرار التحضر - حيث يعيش أكثر من نصف سكان المعمورة في المدن منذ 2007 - مصدراً رئيساً للابتكار إذ أدى التحضر إلى تحسين المستوى المعيشي المادي ووفر فرصاً غير مسبوقة للتعليم والاستثمار الثقافي، ناهيك عن أنه تسبب في تلوث الهواء والمياه بمستويات ضارة، وقاد إلى ازدحام هائل، كما خلق ظروفاً معيشية مخيفة للشريحة الأفقر من سكان المناطق الحضرية. وتتمتع المجتمعات عالية الطاقة بمستوى معيشي أعلى بأشواط قياساً بأسلافهم التقليديين، حيث أدت هذه المكاسب إلى توقعات باستمرار التطورات: لكن نظراً لهيمنة الاجحاف الاقتصادي (الذي غالباً ما يكون بدرجة كبيرة)، نجد أن هذه المنافع قد جرى توزيعها بعيداً عن التساوي. أضف إلى ذلك، عدم وجود ضمان باستمرارية جني المزيد من المكاسب - وهو ما يستتبع تمويل المصروفات بالاقتراض - مع تقدم السكان في العمر.

لقد باتت أسعار الطاقة والتجارة في الوقود والكهرباء وتأمين الامدادات بالطاقة عوامل سياسية مهمة في البلدان المستوردة للطاقة والمصدرة لها على حد سواء، وكان لفترات ارتفاع الأسعار

وانخفاضها بصفة خاصة تبعاتٌ جسيمة طالت الاقتصادات التي تعتمد بدرجة كبيرة على صادرات الهيدروكربونات. كما ترافقت زيادة القوة التدميرية للأسلحة وارتفاع مخاطر اندلاع صراع نووي الذي يحمل تبعات بيئية واقتصادية عالمية بكل ما تحمله الكلمة من معنى مع الاعتراف بعقم الحرب الحرارية النووية وبخطوات للحدّ من إمكانيات اندلاع صراعات كهذه. أما حرق الوقود الأحفوري بكميات هائلة فقد جاء بكثير من التأثيرات البيئية السلبية، وعلى رأسها ارتفاع حرارة الأرض السريع، حيث التخفيف من تأثيرات هذا التهديد يبقى تحدياً جسيماً.

التحضر

تتمتع المدن، حتى الضخمة منها، بتاريخ طويل (مومفورد Mumford أ1961؛ تشاندلر Chandler أ1987). فكانت روما خلال القرن الأول الميلادي تؤوي ما يزيد على نصف مليون شخص. كما سكن بغداد إبان حكم هارون الرشيد في مطلع القرن التاسع 700.000 شخص، في حين عاش في تشانجان المعاصرة (عاصمة أسرة تانج Tang الحاكمة) قرابة 800.000 نسمة. وبعد مرور ألف عام، زاد عدد سكان بيجين، عاصمة أسرة تشين الحاكمة، على مليون نسمة، وفي عام 1800 كان هنالك نحو 50 مدينة يزيد عدد سكانها على 100.000 نسمة. لكن حتى في أوروبا لم تزد نسبة سكان المدن عام 1800 على 10%. إن الزيادات السريعة في عدد سكان أكبر المدن في العالم وفي إجمالي نسب القاطنين في المدن لم تكن لتحدث لولا الوقود الأحفوري. فالمجتمعات التقليدية لا يمكن أن تدعم سوى عدد صغير من المدن الكبيرة كون الطاقة المستخدمة في تلك المدن ستأتي من الأراضي المزروعة بالمحاصيل والغابات التي لا تقل مساحتها عن 50 ضعفاً أو حتى نحو 100 ضعف عن مساحة المستوطنات عينها (المربع 6-11).

تستخدم المدن الحديثة الوقود بكفاءة أعلى بكثير، إلا أن التركيز المرتفع للوقود في المنازل والمعامل والنقل يدفع كثافة طاقته إلى 15 واط/م^2 في المناطق مترامية الأطراف ذات المناخ الدافئ، في حين تصل في المدن الصناعية الباردة إلى 150 واط/م^2 من مساحتها. إلا أن أنواع الفحم والنفط الخام التي تمد بهذه الاحتياجات تستخرج بكثافات طاقة تتراوح عادة بين 1.000 و10.000 واط/م^2 (سميل 2015ب). ما يعني أن مدينة صناعية تحتاج إلى الاعتماد على حقل فحم أو حقل نفط لا يتجاوز حجمه سُبع المساحة المبنية أو بمساحة صغيرة تبلغ 1/ 1.000 تلك المساحة، وكذلك على وسائط التحريك الأولية الجديدة والقوية التي تنقل الوقود من مناطق استخراجه إلى المستخدمين الحضريين. صحيح أن المدن التقليدية كانت مدعومة بتركيز تدفقات الطاقة المنتشرة التي تجمع من مساحات واسعة، إلا أن المدن الحديثة تغذى بتوزيع الطاقة الأحفورية المستخرجة بطريقة مركزة من مناطق صغيرة نسبياً.

وعلى المستوى الغذائي، فإن مدينة حديثة يسكنها 500.000 نسمة وتستهلك يومياً 11 ميغا جول/ فرد (ثلثها يأتي من أغذية حيوانية تحتاج من العلف ما معدله أربعة أضعاف قيمة الطاقة التي تعطيها) ستكون بحاجة إلى مساحة لا تتعدى 70.000 هـ لزراعة المحاصيل، حتى إن كان متوسط غلة تلك المساحة لا يزيد على 4

المربع 6-11

كثافات الطاقة اللازمة لإمداد المناطق الحضرية بالطاقة التقليدية واستخدامها

بمعدل استهلاك الفرد للغذاء البالغ نحو 9 ميغا جول/اليوم والذي يعود معظمه (90%) بأصله إلى أغذية نباتية، شأنه في ذلك شأن الوجبات خلال العصر ما قبل الصناعي، ومع غلال الحبوب الأنموذجية التي لا تتعدى 750 كغ/هـ، تحتاج المدينة التقليدية التي يبلغ عدد سكانها 500.000 نسمة نحو 150.000 هـ من الأراضي المخصصة للمحاصيل. وفي المناخ البارد، تكون الحاجة السنوية من الوقود (خشب وفحم نباتي) نحو 2 طن/فرد. فإذا ما توافر إمداد مستدام بهذه الكمية من الغابات أو من البساتين المخصصة للحطب بإنتاج سنوي قدره 10 أطنان/هـ، فإننا نحتاج إلى قرابة 100.000 هـ لمد المدينة بالوقود. فمدينة مكتظة السكان بهذا الحجم لا تتجاوز مساحتها 2.500 هـ عليها أن تعتمد على مساحة تزيد على مساحتها بنحو 100 ضعف لإمدادها بالغذاء والوقود.

أما فيما يتعلق بمعدل كثافة الطاقة، فإننا نرى أن هذا المثال ينطوي على نحو 25 واط/م2 من إجمالي استهلاك الطاقة، و0.25 واط/م^2 للإمداد. وكان المجال الفعلي لكثافات الطاقة كبيراً نوعاً ما. فاعتماداً على استهلاك الغذاء وممارسات الطبخ والتدفئة، واحتياجات صغار المصنعين للطاقة وكفاءات الاحتراق نرى أن إجمالي استهلاك الطاقة في المدن ما قبل العصر الصناعي تراوح بين 5 و30 واط/م^2 من مساحتها. بينما أعطى الإنتاج المستدام من الوقود المستمد من الغابات والأحراش المجاورة كثافة بين 0.1 و1 واط/م^2. وعليه، يجب على المدن أن تعتمد على مساحات مزروعة بالمحاصيل وأخرى حراجية تزيد عن مساحتها بنحو 50-150 ضعفاً - في حين أن غياب وسائط التحريك الأولية القوية والرخيصة حدّ من القدرة على نقل الأغذية والوقود من المناطق البعيدة، ما تسبب في الضغط على الموارد النباتية للمناطق المحيطة (سميل 2015ب).

طن/هـ، وهذا أقل من نصف إجمالي الكمية في مثال المدينة التقليدية، ناهيك عن أن الوقود الأحفوري والكهرباء يجعلان الواردات واسعة النطاق من الأغذية القادمة من مسافات بعيدة ميسورة التكلفة. فالكهرباء والوقود السائل المخصص للنقل هما فقط ما مكن من ضخ مياه الشرب وترحيل مخلفات الصرف الصحي والنفايات ومعالجتها، والإيفاء باحتياجات النقل والتواصل في المدن الضخمة (المدن التي يزيد عدد سكانها على 10 ملايين نسمة). فلكل مدينة حديثة مجالاتها في تدفقات الطاقة الأحفورية التي يتم تحويلها من خلال كثافات طاقة مرتفعة، إلا أن لدى المدن الضخمة مطالب استثنائية: فقد خلص مسح أجراه كندي وزملاؤه (2015) إلى أن المدن الضخمة

البالغ عددها 27 مدينة في العالم (أي المدن التي يقطنها أقل من 7% من سكان العالم) استهلكت عام 2011 9% من إجمالي الكهرباء و10% من إجمالي البنزين.

كان نهوض مدن الوقود الأحفوري (التي كانت تعتمد في بداياتها على وقود الفحم) نهوضاً سريعاً. ففي عام 1800 كانت مدينة واحدة فقط من أكبر عشر مدن على مستوى العالم، لندن (التي تأتي في المرتبة الثانية)، تقع في بلد يهيمن فيه الفحم على استخدام الطاقة. وبعد مرور قرن، حلت تسع مدن ضمن الفئة المذكورة، وهي لندن ونيويورك وباريس وبرلين وشيكاغو وفيينا وسان بطرسبرغ وفيلادلفيا ومانشستر، في حين كانت طوكيو عاصمة بلد لا يزال فيه وقود الكتلة الحيوية يوفر نحو نصف إجمالي الطاقة الأولية (سميل 2010أ). وكانت نسبة سكان المناطق الحضرية على مستوى العالم عام 1900 لا تتعدى قرابة 15% - لكنها كانت أعلى بأشواط في أكبر ثلاثة بلدان منتجة للفحم في العالم. فقد كانت النسبة تزيد على 70% في المملكة المتحدة، وتقترب من 50% في ألمانيا، ونحو 40% في الولايات المتحدة. كما جاءت استمرارية النمو الحضري لاحقاً بزيادات ملحوظة في إجمالي عدد المدن الكبيرة جداً. فبحلول عام 2015 تجاوز عدد السكان في قرابة 550 من التجمعات الحضرية مليون نسمة قياساً بـ 13 تجمعاً عام 1900، واثنين فقط، بيجين ولندن الكبرى، عام 1800 (سكان المدن 2015).

كذلك غذى الوقود الأحفوري قوى الدفع والجذب اللازمة للهجرة: فقد تم توجيه النمو الحضري بفعل دفع الميكنة الزراعية وجذب التحول الصناعي. فالتحضر والتحول الصناعي ليسا مترادفين بالطبع، إلا أن العمليتين ارتبطتا بشكل وثيق بكثير من الروابط المشتركة المضخمة لعل أبرزها أن الابتكار التقني الذي شهدته أوروبا وأمريكا الشمالية يعود بمعظمه إلى منشأ حضري، ناهيك عن أن المدن لا تزال تشكل خطوط الابتكار (بايروش Bairoch أ1988، وولف Wolfe وبرامويل Bramwell أ2008). وخلص بيتينكورت Bettencourt وويست West أ(2010) إلى نتيجة مؤداها أنه مع تضاعف عدد سكان مدينة ما، تزداد الإنتاجية الاقتصادية بمعدل 130%، وذلك مع ارتفاع إجمالي الإنتاجية وإنتاجية الفرد، حيث نسب بان Pan وزملاؤه (2013) هذه النتيجة بدرجة كبيرة إلى «النطاق فوق الخطي» فالزيادات في كثافة سكان المدن تعطي لقاطنيها فرصة أكبر للتعامل وجها لوجه.

يعد التحول الهائل الذي نقل الأعمال الحضرية نحو قطاعات الخدمات تطوراً شهدته فترة ما بعد الحرب العالمية الثانية. ففي عام 2015، أوصلت هذه التحولات عدد سكان المناطق الحضرية إلى أكثر من 75% من إجمالي عدد السكان لا في الأمم الغربية كافة فحسب، بل في البرازيل والمكسيك أيضاً التي وصلت فيهما النسبة على الترتيب إلى نحو 90% و80%. لكن فقط في كثير من البلدان الأفريقية والآسيوية بقيت نسب سكان الحضر أدنى من 50%، حيث سجلت في الهند 35% وفي نيجيريا 47%، في حين بلغت في الصين 55%. وربما تأثر الرقم المنخفض نسبياً في الصين بدرجة كبيرة بعقود من الضبط الصارم للهجرة في الصين إبان حكم ماو، إلا أن التحضر السريع لم يبدأ سوى خلال تسعينيات القرن الماضي. وقد اندرجت تأثيرات هذا التحول السكاني الجسيم على المستوى الاقتصادي والبيئي والاجتماعي بين أكثر ظواهر التاريخ الحديث التي درست بإسهاب. فحالات البؤس والحرمان والقذارة والأمراض التي شاعت في مدن القرن

التاسع عشر التي شهدت نمواً سريعاً قد تمخضت عن أدب واسع النطاق بصفة خاصة، لتتراوح الكتابات من وصفية أولية (كاي Kay أ1832) إلى ساخطة (إنجلز Engels أ1845)، ومن سلسلة من جلسات الاستماع البرلمانية إلى الروايات الأفضل مبيعاً (ديكنز Dickens أ1845؛ جاسكل Gaskell أ1855).

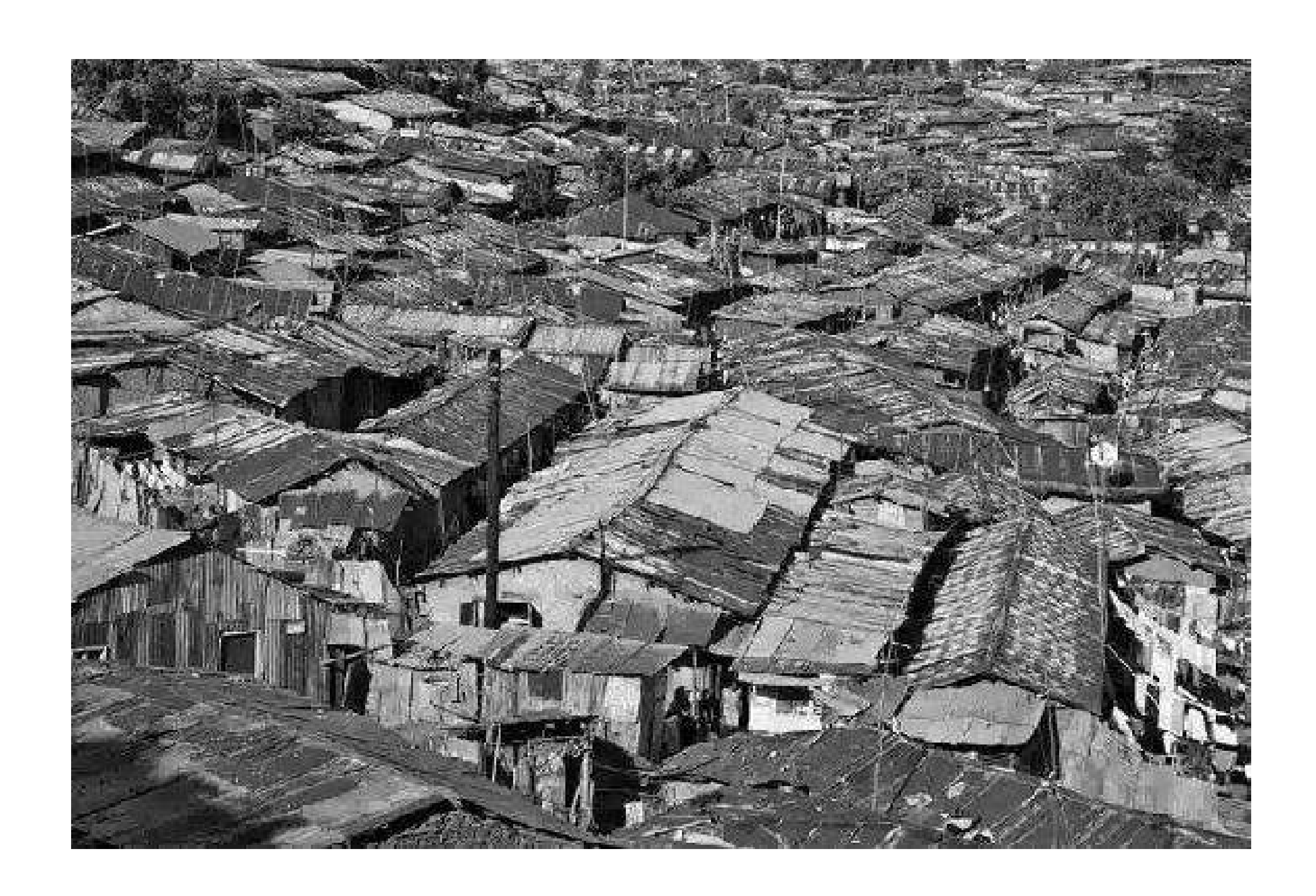
كما يمكن مشاهدة حقائق مشابهة اليوم في كثير من المدن الآسيوية أو الأفريقية أو مدن أمريكا اللاتينية، باستثناء التهديد الناجم عن معظم الأمراض السارية، والتي تراجعت اليوم بفعل التلقيح. إلا أن موجة انتقال الناس إلى المدن لم تتوقف. فاليوم، كما في السابق، تراهم يتركون وراءهم ظروفاً كانت أسوأ بالمجمل، حقيقة اشتركت في تجاهلها كتابات الإصلاحيين والمداولات اللاحقة حول مثالب التحضر. واليوم، كما في السابق، على المرء أن يوازن الحالة المقبضة التي تسود البيئات الحضرية - الإهانات الجمالية، تلوث الهواء والمياه، والضجيج، والازدحام، وظروف العيش الكئيبة في المناطق العشوائية - مع نظيراتها الريفية التي لا تقل عنها سوءاً في أغلب الأحيان.

تشتمل الأعباء البيئية الريفية الشائعة على درجات تركيز مرتفعة جداً من ملوثات الهواء داخل المنزل (وبخاصة مواد الجزيئات الدقيقة) جراء احتراق الكتلة الحيوية من دون تهوية، وعدم كفاية التدفئة في المناخات الباردة، والإمدادات بمياه غير آمنة، وسوء النظافة الشخصية، والسكن المتداعي المكتظ، وقلة فرص تعلم الأطفال أو انعدامها كلياً. أضف إلى ذلك، أن من النادر تفضيل العمل الحقلي في العراء الذي يتطلب كدحاً جسيماً حتى من قبل عمال صناعيين لا يتمتعون بالمهارة داخل أحد المصانع. فبصفة عامة، يتطلب أداء المهام الأنموذجية في العمل مستوى أدنى من صرف الطاقة قياساً بالعمل في المزرعة بشكل عام، وبعد مضي فترة قصيرة من بدء التوظيف بأعداد كبيرة في القطاع الصناعي داخل المناطق الحضرية تنظم ساعات الدوام داخل المصنع على نحو معقول.

تبع ذلك لاحقاً زيادات مطردة في الأجور، اقترنت بمزايا مثل حصول العاملين على تأمين صحي ورواتب تقاعدية، حيث أدت هذه التغيرات إلى جانب فرص تلقي التعليم بمستوى أفضل إلى تطورات في المستوى المعيشي النمطي جديرة بالتقدير. وقادت في نهاية المطاف إلى ظهور طبقة وسطى كبيرة في المناطق الحضرية ضمن اقتصادات حرية النشاط الاقتصادي كافة. وشعر الناس بجذب هذه الإنجازات الغربية العظيمة، التي باتت باهتة اليوم بالتأكيد، على امتداد العالم المتحول إلى الصناعة. كما كانت من دون أدنى شك عاملاً مهماً في فناء النظم الشيوعية، التي تباطأت في إيصال منافع مشابهة. كذلك لا يوجد شك حيال تبعات التحضر على مستوى استهلاك الطاقة؛ فالعيش في المدن يتطلب زيادات كبيرة في توفير الطاقة للفرد حتى في غياب الصناعات الثقيلة أو الموانئ الضخمة: إذ إن كمية الوقود الأحفوري والكهرباء المطلوبة لدعم شخص انتقل للعيش في إحدى المدن الآسيوية النامية حديثاً قد تكون أعلى بقيم أسية قياساً بالكميات المتواضعة من وقود الكتلة الحيوية المستخدمة في القرية مسقط الرأس للطهي ولتدفئة الغرفة (إن استدعى الأمر).

تؤدي زيادة استهلاك الطاقة إلى إحداث تأثيرات تدريجية في العادة (ومفاجئة نوعاً ما في بعض الأمثلة كما في الصين ما بعد عام 1990) ومرغوبة بشدة في متوسط نوعية المعيشة - وهو مصطلح أوسع من «مستوى المعيشة» نظراً لأن نوعية المعيشة تنطوي أيضاً على متغيرات ملموسة أساسية كالتعليم والحريات الشخصية. وخلال عقود النمو الاقتصادي السريع بعد الحرب العالمية الثانية، انتقلت الكثير من البلدان الفقيرة إلى فئة الاستهلاك المتوسط للطاقة مع تحسين سكانها لنوعية حياتهم بصفة عامة (رغم أن هذا التحسين غالباً ما تزامن مع تدهور بيئي)، إلا أن توزيع استخدام الطاقة العالمية يبقى منحرفاً انحرافاً كبيراً. ففي عام 1950 استهلك فقط نحو 250 مليون شخص، أو عُشر سكان العالم، ممن يعيشون في أكثر الاقتصادات رخاءً في العالم، ما يزيد على طنين من مكافئ النفط (84 جيغا جول) في العام للفرد - بالتالي احتاج هؤلاء إلى 60% من الطاقة الأولية على مستوى العالم (باستثناء الكتلة الحيوية التقليدية). وفي عام 2000، وصل عدد هؤلاء السكان إلى ربع عدد سكان العالم، واحتاجوا إلى قرابة ثلاثة أرباع جميع أشكال الوقود الأحفوري والكهرباء. بالمقابل، استخدم الربع الذي يعيش فقراً مدقعاً من السكان أقل من 5% من أشكال الطاقات التجارية كافة (الشكل 6-18).

وبحلول عام 2015 قفزت نسبة استهلاك السكان على المستوى العالمي البالغة أكثر من طنين من مكافئ النفط ووصلت إلى 40% بفضل النمو الاقتصادي السريع للصين، ما شكل أكبر معادلة تقدم في التاريخ. وهذه النسب الصاعقة لا تعكس الاختلافات الحقيقية في معدل نوعية الحياة نظراً لأن البلدان الفقيرة تخصص نسبة أقل بكثير من إجمالي استهلاكها للطاقة لمصلحة الاستخدامات المنزلية الخاصة والنقل وتقوم بتحويل هذه الطاقة بمستوى أدنى من الكفاءات. أما الفارق الحقيقي في الاستخدام الأنموذجي المباشر للطاقة من قبل الفرد بين البقاع الأغنى والأفقر التي يعيش فيها الإنسان فتقترب بالتالي من 40 ضعفاً بدلاً من «مجرد» 20. وهذا التباين الهائل هو واحد من بضعة أسباب رئيسة للفجوة المزمنة في الإنجازات الاقتصادية وفي نوعية الحياة السائدة. كما أن حالات انعدام المساواة هذه تعد بدورها مصدراً



الشكل 18-6

كيبيرا، من أكبر المناطق العشوائية في نيروبي (Corbis). وصل معدل استخدام الفرد في كينيا للطاقة الحديثة إلى نحو 20 جيغا جول/العام، في حين ينخفض استهلاك سكان العشوائيات في أفريقيا وآسيا إلى 5 جيغا جول/العام، أو ما يعادل أقل من 2% من متوسط الاستهلاك الأمريكي.

رئيساً لاستمرارية الافتقار إلى الاستقرار السياسي على المستوى العالمي.

لقد خاضت البلدان التي اندرجت ضمن فئة البلدان ذات الاستهلاك المتوسط من الطاقة غمار مراحل تطور مماثلة لكن بوتيرة مختلفة تماماً: فالتحول الصناعي الذي شهدته أوروبا الغربية على مدى جيلين أو ثلاثة أجيال تحقق مؤخراً في كوريا الجنوبية والصين على مدى جيل واحد من التنمية المضغوطة (ميزة التصميم لدى من بدأ متأخراً). وخلال المراحل المبكرة من النمو الاقتصادي، كانت تلك المنافع محدودة نوعاً ما نظراً لتخصيص الكم الأكبر من الوقود والكهرباء لمصلحة القاعدة الصناعية. أما الزيادة البطيئة في حيازة الأسر والأفراد للسلع وحصولهم على

مستوى أفضل من الوجبات الغذائية الأساس فقد كانت بمثابة المؤشرات الأولى عن التطور، الذي بدأ في المدن ثم انتشر تدريجياً نحو الريف.

ومن المكاسب العظيمة الأولى التنوع الأكبر والجودة الأعلى لمستلزمات الطبخ الأساسية والأطباق والأواني، وعدد أكبر من قطع الملابس التي صارت زاهية الألوان؛ وأحذية أفضل؛ ومستوى أعلى من النظافة الشخصية (استحمام وغسل الملابس بوتيرة أكبر)، وشراء قطع مفروشات إضافية وهدايا صغيرة للمناسبات الخاصة، وتعليق اللوحات (بدءاً من اللوحات المقلدة الرخيصة) على الجدران. أما حيازة طيف أكبر من التجهيزات الكهربائية في أمريكا الشمالية وأوروبا خلال مطلع القرن العشرين فقد جاء في المرحلة التالية من «البرجزة»، إلا أن انخفاض تكلفة الأجهزة الكهربائية الجديدة (المكيفات وأفران المايكروويف والتلفزيونات) والأجهزة الإلكترونية (على رأسها الهواتف الجوالة) يعني أن الأسر في كثير من البلدان الآسيوية وبعض البلدان الأفريقية قد اقتنتها قبل اقتنائها أشياءَ منزلية أفضل.

أما المرحلة التالية فشهدت مزيداً من التطورات على مستوى تنوع الإمداد بالأغذية ونوعيتها، فضلاً عن ارتفاع مستوى الرعاية الصحية، حيث بدأت تلك التطورات بالامتداد نحو الريف. كذلك بدأ المستوى التعليمي لدى سكان المناطق الحضرية بالارتفاع، مع ظهور مؤشرات متزايدة عن بداية حياة الرخاء بما في ذلك امتلاك السيارات والوسائل المنزلية المريحة، والسفر إلى خارج البلاد لأصحاب الدخل الأعلى. ومرة أخرى نجد أن بعض المكاسب اختلطت أو انقلبت مؤخراً لاسيما في آسيا فوصلت في نهاية المطاف إلى مرحلة الاستهلاك الجماعي مع كل ما يرتبط به من مستويات راحة مادية ومظاهر مفاخرة متكررة. ومن بين هذه التغيرات أيضاً فترات الدوام المدرسي الأطول، وزيادة معدل التنقلات الشخصية، ونمو الإنفاق على قضاء وقت الفراغ والصحة.

إن التلازم بين هذا التسلسل ومعدل استهلاك الفرد للطاقة هو تلازم واضح، لكن ما يخضع للمقارنة عادة - كمعدل استهلاك الفرد المحسوب وفقاً لإجمالي إمداد البلد بالطاقة الأولية وتقسيمه على إجمالي عدد السكان - ليس دائماً بالمتغير الأفضل. فمعدل استهلاك الفرد من إجمالي الإمداد بالطاقة الأولية لا ينبئنا بأي شيء، لا عن تراجع الاستهلاك (إذ يكون القطاع العسكري مسؤولاً عن كميات كبيرة غير متكافئة من الاستهلاك، كما هي الحال بالنسبة إلى الاتحاد السوفييتي وكوريا الشمالية وباكستان) ولا عن الكفاءة الأنموذجية (أو المتوسطة) لتحولات الطاقة (استهلاك أعلى، وبالتالي تقديم خدمات نهائية أكثر في وحدة الطاقة الإجمالية، في اليابان قياساً بالهند). كما قد تظهر رؤى أفضل من مقارنة النسب المتوسطة لاستهلاك السكان للطاقة، لكن هذه الإشارة نادراً ما تتسم بكمالها أيضاً: إذ يؤخذ بالاعتبار استهلاك الوقود والكهرباء من قبل الأسر، بينما تستبعد المدخلات الهائلة غير المباشرة للطاقة (التي كانت مطلوبة لبناء المنازل أو لصناعة السيارات والتجهيزات المنزلية والأجهزة الإلكترونية والمفروشات).

عندما نأخذ هذه الجوانب بالحسبان، وندرك أن الخصوصيات الملازمة لكل بلد (من التفردات المناخية إلى الاقتصادية) تمنع التوصل إلى أي تصنيف بسيط، نجد أن من الممكن تقسيم العلاقة بين استخدام الطاقة ونوعية المعيشة إلى ثلاث فئات أساسية؛ فلا يمكن لأي بلد يبلغ معدل

الاستهلاك السنوي فيه من الطاقة التجارية الأولية (باستثناء الوقود الحيوي التقليدي) أقل من 5 جيغا جول/فرد (أي نحو 120 كغ من مكافئ النفط) أن يضمن حتى الضروريات الأساسية لمواطنيه كافة. ففي عام 2010 كان المعدل في إثيوبيا من دون الحد الأدنى، وبنغلاديش بالكاد تجاوزته؛ أما الصين فقد كانت عند المعدل قبل 1950، مثلما كانت مناطق كبيرة في أوروبا الغربية قبل عام 1800.

وبمعدل استخدام تجاري للطاقة يقترب من 1 طن من مكافئ النفط (42 جيغا جول)، نجد أن ثمة تطورات ملحوظة في ميدان التحول الصناعي وارتفاع الدخل ونوعية الحياة. فالصين خلال ثمانينيات القرن الماضي واليابان خلال الثلاثينيات ثم الخمسينيات من القرن عينه، وأوروبا الغربية والولايات المتحدة ما بين 1879 و1890 تشكل جميعاً أمثلة عن هذه المرحلة من التطور. ويتطلب الرخاء الأولي، حتى مع الاستخدام الكفء نوعاً ما للطاقة لا يقل عن طنين من مكافئ النفط (84 جيغا جول) للفرد في العام. وهذا ما تمكنت فرنسا من بلوغه خلال ستينيات القرن الماضي، وكذلك اليابان خلال سبعينيات القرن عينه. أما الصين فقد وصلت إلى هذا المستوى بحلول عام 2012، إلا أن نسبتها لا تقارن أبداً مع النسب الغربية نظراً لأن ثمة قدراً كبيراً من الطاقة المستخدمة لا يزال يصب في الصناعة (نحو 30% عام 2013)، بينما يخصص القليل منها لاستخدام الطاقة في قطاعات خاصة اختيارية (الوكالة الدولية للطاقة 2015أ).

إلا أن المكاسب التي حققتها كل من فرنسا والصين توضح سرعة التغيرات التي جرت مؤخراً. فقد كشف الإحصاء الفرنسي لعام 1954 عن مستوى العجز الصاعق في ميدان السكن: إذ إن نسبة المنازل التي تنعم بالمياه الجارية لا تتعدى 60%، بينما تفتقر نسبة 25% من تلك المنازل في داخلها إلى المراحيض، أما الحمامات والتدفئة المركزية فتقتصرعلى 10% منها فقط (بروست Prost أ1991). وفي منتصف سبعينيات القرن الماضي، كانت الثلاجات متوافرة في نحو 90% في المنازل، والمراحيض في 75% منها، بينما توافرت الحمامات في 70% من المنازل، وتمتع 60% منها بتدفئة مركزية وغسالات. أما في عام 1990 فقد بات الجميع من الناحية الافتراضية يمتلك تلك المنافع، بينما 75% من مجمل الأسر امتلك سيارة، قياساً بأقل من 30% عام 1960. وارتفع استهلاك الفرد الفرنسي من الطاقة بنحو 25%، ليشهد هذا الاستهلاك ارتفاعاً هائلاً وصل إلى ما يزيد على 80% عام 1974؛ وبينما سجل إمداد الفرد بأنواع الوقود كافة زيادة بأكثر من الضعف خلال الفترة بين عامي 1950 و1990، ارتفع استهلاك البنزين قرابة ستة أضعاف، وازداد استخدام الكهرباء بأكثر من ثمانية أضعاف (سميل 2003).

شهدت الصين أيضاً تطورات اتسمت بوتيرة أسرع. ففي عام 1980، وهو العام الذي بدأ معه الإصلاح الاقتصادي (عقب أربع سنوات من رحيل ماو تسي تونغ)، بلغ متوسط استهلاك الفرد للطاقة 19 جيغا جول؛ وبحلول عام 2000 اقترب الاستهلاك من 35 جيغا جول؛ لكن في عام 2010، وبعد أن ارتفع الاستهلاك بنحو أربعة أضعاف خلال ثلاثة عقود، وصل إلى قرابة 75 جيغا جول؛ ليتجاوز عام 2015 حاجز 90 جيغا جول (سميل 1976؛ الفريق المعني بالطاقة الصينية 2015)، وهذا مستوى يوازي المستوى الإسباني خلال مطلع ثمانينيات القرن الفائت. أضف إلى ذلك أن نسباً غير متكافئة من هذه المكاسب قد وُظفت في الإنشاءات. ولا شيء يشير

إلى هذا الجانب أكثر من ملاحظة أنه في الوقت الذي ارتفع الاستهلاك الأمريكي من الإسمنت بنحو 4.5 جيغا طن خلال كامل القرن العشرين، استهلكت الصين كمية أكبر (4.9 جيغا طن) من الإسمنت في مشاريع إنشاءات جديدة خلال فترة ثلاث سنوات فقط بين 2008-2010 (سميل 2014). ولا عجب إذن أن نجد لدى البلد اليوم أكبر الشبكات الحديثة على مستوى العالم من خطوط السكك الحديدية المخصصة للسرعات العالية والطرق السريعة الممتدة بين المقاطعات.

ليس ثمة شكل من أشكال الطاقة أشد تأثيراً في تحسين نوعية الحياة من توفير الكهرباء بتكاليف ميسورة: فعلى المستوى الشخصي، أحدثت الكهرباء تأثيرات واسعة وساعدت على إنقاذ الحياة (إذ وضع المواليد الخُدّج في الحاضنات، وحفظت اللقاحات اللازمة لتلقيحهم في الثلاجات، وشُخصت الأمراض الخطيرة في الوقت المناسب لعلاجها من خلال تقنيات غير باضعة، وتم ربط المرضى ذوي الحالات الحرجة بشاشات مراقبة إلكترونية). إلا أن التأثيرات الاجتماعية الأهم تكمن في تغيير كثير من الأعمال المنزلية التي نفعت المرأة أكثر من غيرها، وقد حدث هذا التغيير في وقت قريب نسبياً، حتى في العالم الغربي.

لقد حقق ارتفاع استهلاك الطاقة عبر الأجيال فروقات طفيفة طالت العمل اليومي للأسر، إلا أنها قد تؤدي في الواقع إلى جعل المسألة أسوأ. فنظراً لارتفاع المقاييس الصحية والتوقعات الاجتماعية وارتفاع مستوى التعليم، نجد أن أعمال المرأة في البلدان الغربية تزداد صعوبة في الغالب. فسواء أكانت المرأة تقوم بالغسيل والطهي والتنظيف في شقق إنجليزية ضيقة (سبرينج - رايس Spring-Rice أ1939)، أم بالأعمال اليومية داخل بيت ريفي أمريكي، فإن أعمالها بقيت مضنية طوال ثلاثينيات القرن الماضي حتى جاءت الكهرباء كمحرر نهائي لها. وبغض النظر عن توافر أشكال أخرى للطاقة، كان إدخال الكهرباء هو المسؤول فقط عن انتشال المرأة من براثن العمل المرهق والخطير في الغالب (كارو Caro أ1982؛ المربع 6-12).

بات الكثير من التجهيزات الكهربائية متاحاً بحلول عام 1900: فخلال تسعينيات القرن التاسع عشر كانت شركة جنرال إلكتريك تبيع المكاوي والمراوح الكهربائية وسخانات الماء الكهربائية القادرة على غلي نصف لتر من الماء خلال 12 دقيقة (مجلس الكهرباء 1973). ولعل ارتفاع تكاليف هذه التجهيزات ومحدودية التمديدات الكهربائية المنزلية وبطء إيصال الكهرباء إلى المناطق الريفية أخرَّ اعتمادها على نطاق واسع في كل من أوروبا والولايات المتحدة حتى ثلاثينيات القرن الماضي. أما التبريد فقد كان الابتكار الذي فاقت أهميته أهمية الغاز أو الكهرباء في الطبخ (بنتزر Pentzer أ1966). وكانت كلفيناتور أولى شركات تسويق الثلاجات المنزلية عام 1914، حيث شهدت حيازة الثلاجات في أمريكا زيادة حادة خلال أربعينيات القرن الماضي، بينما لم ينتشر استخدام الثلاجات في أوروبا إلا بعد عام 1960. وازدادت الثلاجات أهميةً مع تنامي الاعتماد على الأغذية السريعة، حيث بات

المربع 6-12

أهمية الكهرباء في تيسير العمل المنزلي

تم توضيح تأثيرات الكهرباء التي أدت إلى التحرر على نحو يبقى ماثلاً في الأذهان في المجلد الأول من سيرة ليندون جونسون للكاتب روبرت كارو (1982). فكما يشير كارو، لم يكن نقص الطاقة هو ما جعل الحياة في مقاطعة تكساس هيل شاقة (فقد كان لدى الأسر الكثير من الخشب والكيروسين)، بل كان غياب الكهرباء. إذ جاء في إفادة كارو المؤثرة، والمؤلمة جسدياً إلى حد ما، وصف لمدى الكدح والخطر الناجم عن الكيّ باستخدام أسافين من المعدن المسخن فوق مواقد الحطب، فضلاً عن ضخ المياه ونقلها الذي لا ينتهي من أجل الطبخ والغسيل وسقاية الحيوانات، ناهيك عن طحن العلف ونشر الخشب. هذه الأعباء، التي وقعت على كاهل النساء في معظمها، كانت أصعب من متطلبات العمل الاعتيادي في البلدان الفقيرة، حيث جاهد مزارعو مقاطعة هيل خلال ثلاثينيات القرن الماضي للحفاظ على مستوى معيشة أعلى وإدارة أنشطة زراعية أوسع قياساً بفلاحي آسيا وأمريكا اللاتينية. على سبيل المثال، بلغت الاحتياجات المائية لعائلة مؤلفة من خمسة أفراد نحو 300 طن/سنة، حيث تطلب إمدادهم بهذه الكمية ثماني ساعات عمل على مدى 60 يوماً والسير قرابة 2.500 كم. فلا عجب بعد هذا أن لا نجد ما يستحق الوصف بأنه تحول ثوري في حياة أولئك الأشخاص أكثر من تمديد خطوط نقل الكهرباء.

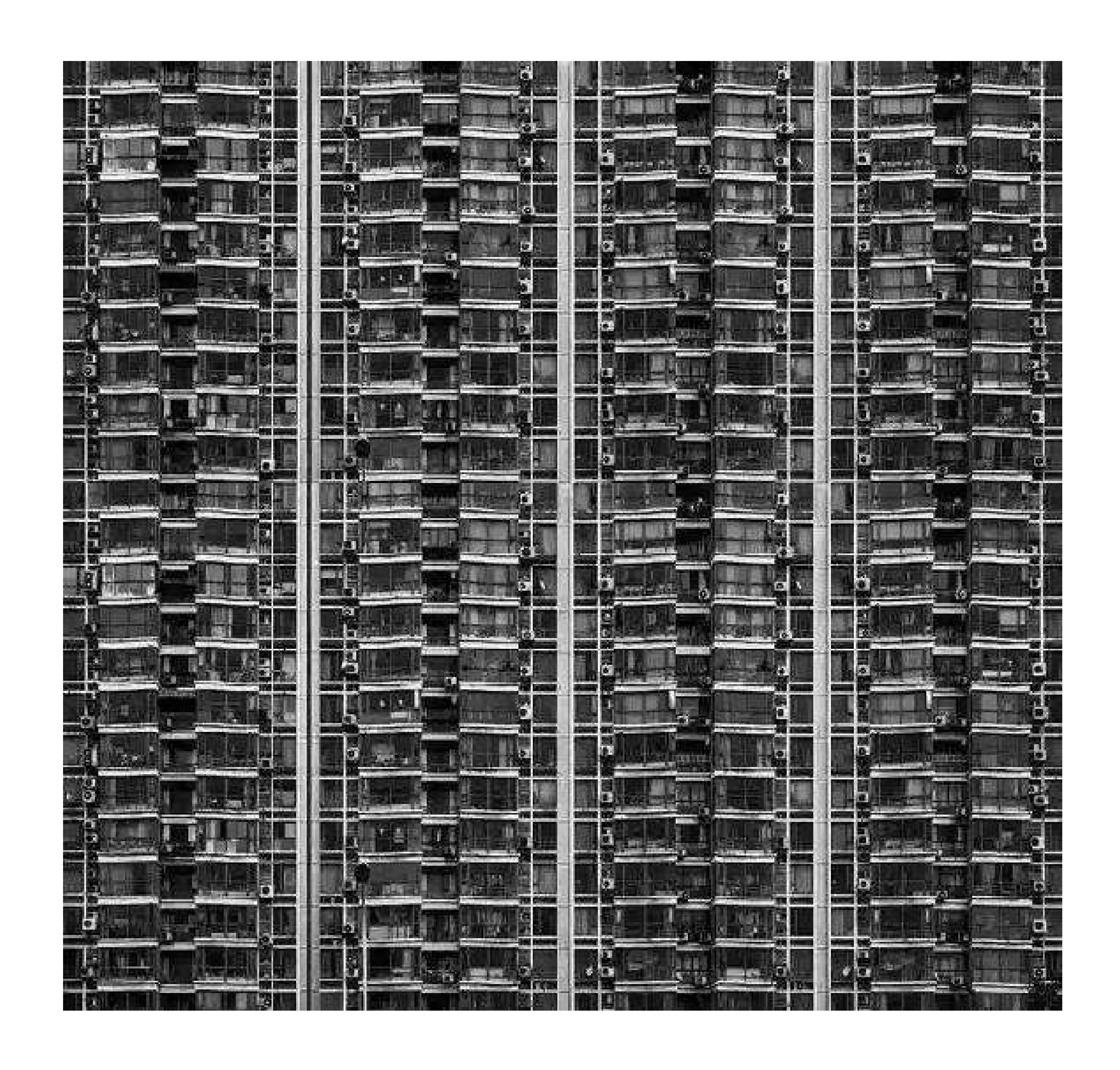
التبريد اليوم مسؤولاً عن استهلاك حتى 10% من الكهرباء المستخدمة في المنازل لدى الأمم الثرية.

لا يزال السعي نحو تزويد الخدمات المنزلية بالكهرباء يحقق توفيراً أكبر في الوقت والجهد في البلدان الثرية. إذ شاع استخدام الأفران ذاتية التنظيف، والطبخ اعتماداً على أجهزة تحضير الطعام والمايكرويف (الذي طور في عام 1945، لكن لم يُعرض في نماذج منزلية صغيرة إلا في أواخر ستينيات القرن الماضي) على امتداد العالم الثري. كما اقتربت حيازة الثلاجات والغسالات وأجهزة المايكرويف من مستويات الإشباع بين شرائح السكان الموسرين في آسيا وأمريكا اللاتينية الذين صاروا يمتلكون أعداداً أكبر من مكيفات الهواء. فتكييف الهواء، الذي تعود براءة اختراعه أول مرة لـ ويليس كارير Willis Carrier أ(1876-1950) عام 1902، ظل لعقود مقتصراً على التطبيقات الصناعية. أما أول المكيفات الذي دخل نطاق الاستخدام المنزلي فكان في خمسينيات القرن الماضي في الولايات المتحدة، حيث فتح انتشار اقتنائها في منطقة «الحزام الشمسي» الباب أمام الهجرة من الولايات الشمالية بأعداد كبيرة، كما زادت رغبة السياح في التوجه إلى المناطق شبه المدارية والمدارية (باسيل Basile أ2014). وباتت مكيفات الهواء المنزلية تستخدم على نطاق واسع اليوم أيضاً في مدن البلدان الحارة، معظمها مكيفات جدارية مخصصة لغرفة واحدة (الشكل 6-19).

تتميز المجتمعات الحديثة بنمو اقتصادي مرتفع، وبالتالي بارتفاع استخدام الطاقة إلى مستوى الأمنيات الصريحة، وبالتالي الافتراض ضمناً أن زيادة استخدام الطاقة سيؤتي أكله بلا شك. إلا أن

النمو الاقتصادي وارتفاع استخدام الطاقة قد اعتبر وسيلة فقط نحو تأمين نوعية حياة أفضل، مفهوم لا يشتمل على تلبية الاحتياجات المادية الأساسية فحسب (كالصحة والتغذية)، بل ينطوي على تطوير الفكر البشري أيضاً (الذي يتراوح من التعليم الأساسي إلى الحريات الفردية). وإن مفهوماً متعدد الأبعاد كهذا لا يمكن حصره في مؤشر تمثيلي وحيد، بل يبدو أن هنالك بعض المتغيرات التي تعمل كمؤشرات عن حساسيته.

تعد وفيات الرضع (عدد الوفيات/1.000 مولود حي) ومعدل الأعمار مؤشرين واضحين لا يشوبهما غموض عن نوعية الحياة المادية. فوفيات الرضع تمثيل ممتاز لظروف تتراوح بين توافر الدخل ونوعية السكن إلى كفاية التغذية ومستوى التعليم واستثمار الدولة في الرعاية الصحية، إذ ينخفض عدد وفيات الأطفال في البلدان التي تعيش فيها الأسر في منازل جيدة وتقدم لهم تغذية صحية، مع رعاية طبية. كما يحدد معدل الأعمار، طبيعياً، حجم التأثيرات طويلة الأجل لتلك المؤشرات الجوهرية. أما البيانات المتعلقة بالتعليم والثقافة فليست واضحة تماماً، إذ إن نسب التسجيل



الشكل 6-19

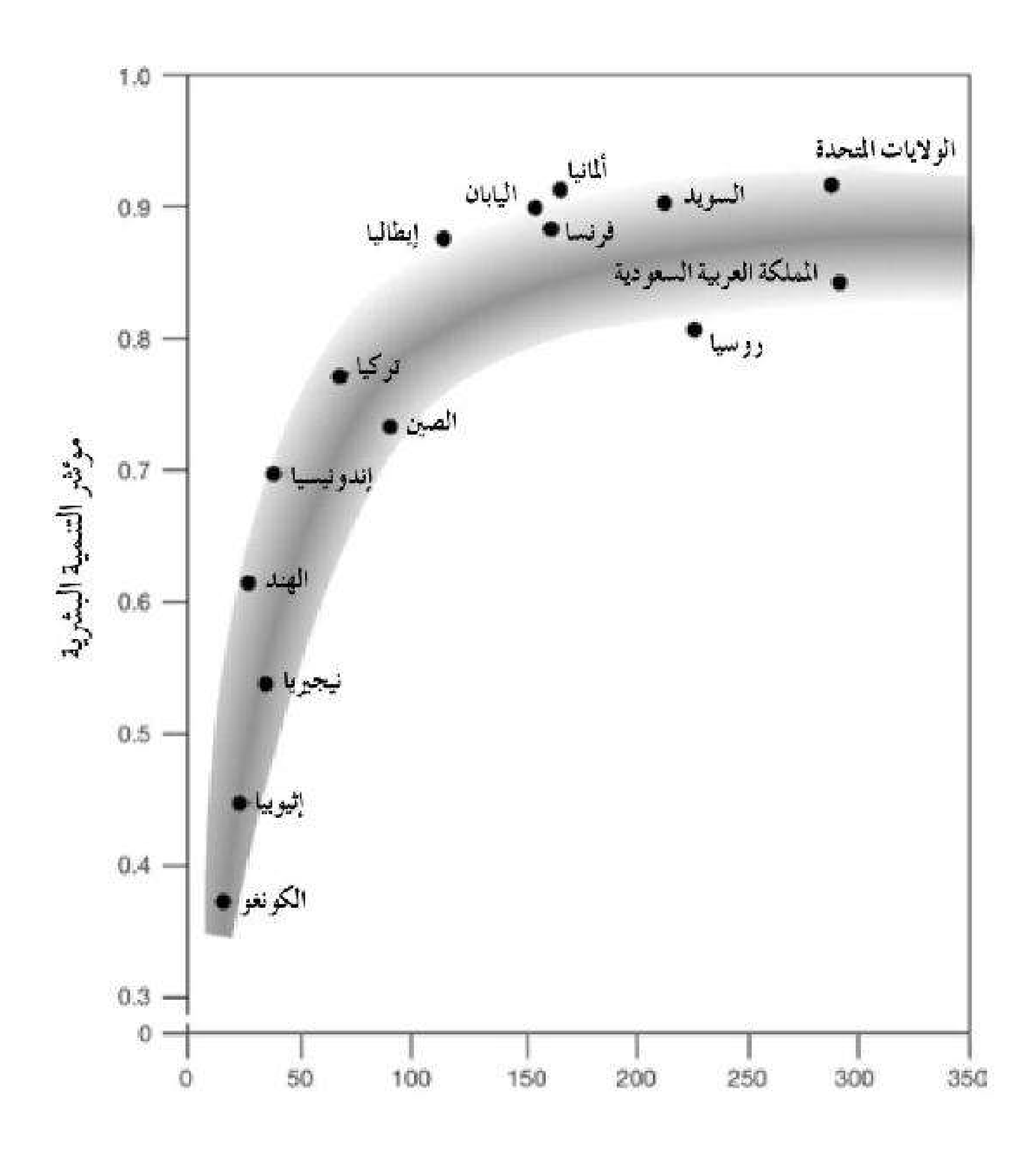
مبنى سكني شاهق الارتفاع في شنغهاي، مزود بمكيفات هواء لكل غرفة تقريباً (Corbis).

تخبرنا عن تلقي التعليم، لكنها لا تخبرنا عن نوعيته، ناهيك عن عدم إتاحة التحصيل الدراسي المفصل (كبرنامج التقييم الدولي للطلاب الخاص بمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، أو ما يعرف اختصاراً بـ PISA) في معظم البلدان. أما الخيار الآخر فهو استخدام مؤشر التنمية

البشرية لبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي الذي يجمع بين معدل الأعمار عند الولادة ومحو الأمية عند الكبار والتسجيل لتلقي التعليم وإجمالي الناتج المحلي للفرد.

تقودنا مقارنة هذه القياسات بمعدل استخدام الطاقة إلى بعض الاستنتاجات المهمة. فقد باتت بعض المجتمعات قادرة على تأمين ما يكفي من الوجبات الغذائية، وتوفير الرعاية الصحية الأساسية والتعليم المدرسي، فضلاً عن توفير نوعية حياة كريمة ينخفض فيها الاستخدام السنوي للطاقة إلى 40-50 جيغا جول/فرد. ويمكن بلوغ عدد منخفض من وفيات الرضع، أقل من 20/ 1.000 من حديثي الولادة؛ ومعدل أعمار إناث مرتفع نسبياً، فوق 75 عاماً؛ ومؤشر تنمية بشرية أعلى 0.8 بكمية 60-65 جيغا جول/فرد، بينما تتطلب النسب الأعلى عالمياً (وفيات أطفال أقل من 10/ 1.000 من حديثي الولادة، ومعدل عمالة إناث يزيد على 80، ومؤشر تنمية بشرية > 0.9) 110 جيغا جول/فرد كحد أدنى، حيث لا يوجد تحسن ملحوظ في النوعية الأساسية للحياة فوق ذلك المستوى.

وعليه، فإن استخدام الطاقة يرتبط بنوعية الحياة بأسلوب خطي إلى حد ما وذلك فقط خلال المراحل الأدنى للتنمية (متجهين من نوعية الحياة في النيجر إلى نوعية الحياة في ماليزيا). وتظهر القيم المحددة على المخطط تقوسات واضحة لأنسب الخطوط بين 50 و70 جيغا جول/فرد، يعقبها تراجع في الإيرادات، ومن ثم استقرار عن مستويات أعلى (اعتماداً على متغير نوعية الحياة الخاضع للدراسة) 100-120 جيغا جول/فرد (الشكل 6-20). وهذا يعني أن تأثير استهلاك الطاقة في تحسين نوعية الحياة - مقاساً بالمتغيرات المؤثرة فعلاً، وليس بامتلاك اليخوت - قد وصل إلى مستوى إشباع أدنى بكثير من معدلات استخدام الطاقة السائدة في البلدان التي تنعم بالرخاء، حيث وصلت الاقتصادات الرائدة في الاتحاد الأوروبي واليابان إلى نحو 150 جيغا جول/فرد، وأستراليا إلى 230 جيغا جول/فرد، بينما سجلت الولايات المتحدة 300 جيغا جول/فرد، وكندا 385 جيغا جول/فرد عام 2015 (الشركة البريطانية للنفط 2015). أما الزيادات الإضافية في الاستخدام التقديري للطاقة فتذهب إلى السكن الفاخر (فعدد أفراد الأسرة تضاءل، وازداد حجم البيوت الأمريكية بأكثر من الضعف منذ خمسينيات القرن الماضي)، فضلاً عن ملكية العديد من المركبات باهظة الثمن، والسفر جواً برحلات متكررة.



الشكل 6-20

معدل استهلاك الفرد للطاقة ومؤشر التنمية البشرية عام 2010. المخطط يستند إلى بيانات برنامج الأمم المتحدة الإنمائي (2015) والبنك الدولي (2015أ).

أما الجانب الأبرز فتمثل في ترافق الاستخدام المرتفع للطاقة في أمريكا مع مؤشرات نوعية حياة أدنى لا عند مقارنتها مع أداء البلدان الأوروبية الرائدة أو اليابان (التي تستخدم من الطاقة نصف نسبة استخدام الولايات المتحدة لها) فحسب، بل عند مقارنتها بأداء كثير من البلدان متوسطة استخدام الطاقة. ففي عام 2013، صنفت الولايات المتحدة، التي نسبة وفيات المواليد فيها 6.6 من كل 1.000 مولود حي خلال العام الأول، في المرتبة 31 على مستوى العالم، وبذلك لا تكون فقط أدنى من فرنسا (3.8)، وألمانيا (3.5) واليابان (2.6) فحسب، بل أيضاً أعلى بضعفي نسبة وفيات المواليد في اليونان (مركز مكافحة الأمراض 2015). والأسوأ من ذلك، أن معدل الأعمار في أمريكا عام 2013 صنف في المرتبة 36 على مستوى العالم، حيث سجل 79.8 عام لكلا الجنسين، وبذلك يكون بالكاد أفضل من كوبا إبان حكم كاسترو (79.4) وبعد معدل الأعمار في اليونان والبرتغال وكوريا الجنوبية (منظمة الصحة العالمية 2015أ).

تخضع الإنجازات التعليمية للطلاب في بلدان منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي إلى تقييم منتظم من خلال برنامج التقييم الدولي للطلاب PISA، حيث تظهر آخر النتائج أن الطالب الأمريكي بعمر 15 عاماً يحتل مرتبة متأخرة على نظيره في روسيا وسلوفاكيا وإسبانيا، وأدنى بكثير من المراهقين في ألمانيا وكندا واليابان (برنامج التقييم الدولي للطلاب 2015). وفي مادة العلوم، كان الأطفال الأمريكان أدنى من متوسط الدرجة في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (497 مقابل 501)؛ أما في مادة القراءة فكانوا بالكاد أعلى من المتوسط (498 مقابل 496)، وحلوا في مرتبة أدنى بكثير من البلدان الغربية كافة المكتظة التي تنعم بالرخاء. إلا أن برنامج التقييم الدولي للطلاب يتسم بنقاط ضعف، شأنه في ذلك شأن الكثير من الدراسات المماثلة، في حين تبقى الاختلافات الجسيمة في الترتيب النسبي واضحة، إذ لا توجد أدنى إشارة إلى أن الاستخدام المرتفع للطاقة في أمريكا يحمل أي تأثير نافع يصب في الإنجازات التعليمية للبلد.

تبعات سياسية

أسفر اعتماد المجتمعات الحديثة على إمدادات متواصلة وموثوقة وزهيدة التكاليف من الوقود الأحفوري والكهرباء (التي يتم إيصالها بمعدلات مطلوبة وهائلة على نحو مستمر اليوم) عن العديد من المخاوف والاستجابات السياسية على المستويين المحلي والخارجي. ولعل أكثر المخاوف شمولية تبقى في تركيز سلطة صناعة القرار الناجمة عن مستويات تكامل أعلى، سواء على مستوى الحكومة أم قطاع الأعمال أم الجيش. ووفقاً لما أشار إليه آدمز Adams أ(1975، 120-121)، عندما «تدخل العمليات والأشكال التي تستلزم طاقة مرتفعة مجتمعاً ما، يبقى التحكم بها محصوراً بيد أفراد قليلين على نحو أبعد ما يكون عن التكافؤ، وبالتالي يُتخذ عدد أقل من القرارات المستقلة بخصوص تحرير كميات أكبر من الطاقة».

لكن مخاطر أكبر تطفو على السطح حين تتقلص دائرة هذا التحكم أكثر فينحصر بيد شخص واحد يكون هو من يقرر استخدام تلك الطاقة بطريقة عدوانية ومدمرة. فسوء توجيهها يسفر عن معاناة هائلة للبشرية، وضياع كبير للعمل والموارد، ناهيك عن إحداث أضرار في البيئة، وتدمير التراث

الثقافي. ويشكل تقلص دائرة التحكم على نحو مفرط بإطلاق القوى المدمرة ظاهرة متكررة عبر التاريخ. فإذا ما أردنا قياسها على مستوى الأضرار البشرية، وجدنا أن القرارات التي اتخذها الملوك الإسبان خلال القرن السادس عشر، ومن قبل نابليون بونابرت Napoleon Bonaparte أ(1769-1821)، والقيصر فيلهلم الثاني Kaiser Wilhelm II أ(1859-1941)، أو من قبل أدولف هتلر (1889-1945) قد أسفرت عن ملايين القتلى. كما أسفرت الغزوات الإسبانية للقارة الأمريكية في نهاية المطاف عن قتل عشرات الملايين بصورة مباشرة (من خلال القتل في المعارك والعبودية) وغير مباشرة (من خلال الأمراض المعدية والمجاعات) (لوبيز López أ2014)؛ بينما كلفت سلسلة الأعمال العدوانية التي قام بها نابليون ما لا يقل عن 2.5 مليون وإزهاق أرواح حتى خمسة ملايين شخص (غيتس Gates أ2011)؛ كذلك العدوان البروسي كان السبب إلى حد ما في حصد أرواح أكثر من 17 مليون شخص خلال الحرب العالمية الأولى؛ بينما اقترب إجمالي عدد القتلى خلال الحرب العالمية الثانية، العسكريون منهم والمدنيون، من 50 مليون شخص (وقائع حرب 2015).

إلا أن قرارات الدكتاتورَين الشيوعيين التي لا تقبل المعارضة واللذين قد يحوّلا ما لديهما من هوس إلى حقائق مخيفة مع توافر تدفق أكبر للوقود الأحفوري والكهرباء تلخص على نحو لا نظير له المخاطر المتعلقة بانحصار دائرة التحكم. ففي عام 1953، وهو العام الذي مات فيه ستالين، زاد استخدام الاتحاد السوفييتي من الطاقة عن 25 ضعفاً قياساً بإجمالي استخدامه للطاقة عند خروج البلد من حربه الأهلية عام 1921 (كلارك Clarke ودوبرافوكو Dubravko أ1983). إلا أن جنون العظمة لدى القائد العام تسبب في فناء عشرات الملايين في عمليات التطهير، وإعادة توطين كامل السكان (شعوب القرم، والتتر، والجرمان الذين سكنوا وادي نهر الفولجا، والشيشان)، وإلى ظهور إمبراطورية معسكرات العمال، وانهيار اقتصادي لما قد يكون أغنى الأمم في المعمورة؛ حيث لا يمكن إحصاء العدد الإجمالي للوفيات بدقة، لكنه يتراوح بين 15-20 مليوناً (الفتح Conquest أ2007).

وبالمثل، عند رحيل ماو تسي تونغ عام 1976، كان إنتاج الصين من الطاقة يزيد على 20 ضعف إجمالي نظيره عام 1949 (سميل 1988). إلا أن أوهام هلمان العظيم جلبت موجات موت متعاقبة من خلال الحركة التي عرفت باسم «قفزة عظيمة نحو الأمام» التي جاء في أعقابها أسوأ مجاعة في تاريخ البشرية، حيث حصدت أرواح أكثر من 30 مليون صيني بين عامي 1959 و1961 (يانج Yang أ2012)، ومن ثم تدمير الثورة الثقافية. وهنا أيضاً لا يُعرف العدد الإجمالي للوفيات بدقة، إلا أن إجمالي العدد بين عامي 1949-1976 ربما يقترب من 50 مليوناً (ديكوتر Dikötter أ2010). صحيح أن احتمالية التهديد الأعظم بشن حرب نووية بين القوى العظمى قد تراجعت بفضل الحد من ترسانة الأسلحة النووية الأمريكية والروسية، إلا أن إمكانية تلك الحرب لا تزال قائمة والقرار بإشعال فتيلها من أحد الجانبين يبقى محصوراً في يد ثلة صغيرة جداً من الأشخاص.

ليس ثمة مثال عن التبعات السياسية والاقتصادية على المستوى العالمي الناجمة عن انحصار دائرة التحكم بتدفق الطاقة أفضل من القرارات التي اتخذتها منظمة الأقطار المصدرة للنفط منذ عام

1973. فلو أخذنا بعين الاعتبار أهمية النفط الخام في الاقتصادات الحديثة وهيمنة بعض بلدان الشرق الأوسط على سوق التصدير العالمية، لوجدنا أن القرارات بغض النظر عن ماهيتها والتي يتخذها بضعة أفراد، ستحمل تبعات وخيمة حتما تطال الازدهار العالمي. ولعل عدم ارتياح أوبك للعائدات المنخفضة وبالتالي زيادة أسعار النفط عالمياً بمقدار خمسة أضعاف خلال الفترة 1973-1974، وارتفاعها ثانية لنحو أربعة أضعاف قيمتها خلال الفترة 1979-1980 تسبب في فترة تفكك اقتصادي عالمي وزاد في عمقها، حيث اتسمت تلك الفترة بتضخم كبير وتراجع ملحوظ أصاب النمو الاقتصادي (سميل 1987؛ يرجين Yergin أ2008).

استجابة لذلك، أعدت البلدان الغربية كافة الرئيسة المستوردة ومعها اليابان اتفاقات طوارئ لاقتسام الطاقة عمل على تنسيقها الوكالة الدولية للطاقة، وأُجبرت على تأسيس احتياطي استراتيجي من النفط (في حين أقامت بعض البلدان علاقات ثنائية أوثق مع بلدان أوبك)، كما دعمت السعي المحلي للاكتفاء ذاتياً من الوقود من خلال تحفيز استخدام مصادر بديلة للطاقة. وكان تطوير فرنسا للكهرباء النووية وجهود اليابان لحفظ الطاقة خطوة ملحوظة وفعالة بصفة خاصة. إلا أن النمو الاقتصادي السريع في الصين، الذي دفع البلد ليكون مستورداً صرفاً للنفط عام 1994، وتراجع إنتاج حقول النفط التقليدية، سواء في ألاسكا أم في بحر الشمال، كانت الأسباب الرئيسة وراء الارتفاع الآخر الذي طرأ على سعر النفط عالمياً ليصل إلى مستوى قياسي بلغ نحو 145 دولاراً للبرميل خلال يوليو/تموز 2008، زيادة لم تتوقف إلا مع الأزمة الاقتصادية التي شهدها خريف 2008 حيث وصل سعر برميل النفط بالكاد إلى 30 دولاراً خلال ديسمبر/كانون الأول 2008.

ومع تعافي الاقتصادات واستمرار ارتفاع الطلب الصيني، عاودت أسعار النفط ارتفاعها ثانية ليتجاوز سعر البرميل 100 دولار في يوليو/تموز 2014، إلا أن تراجع الطلب وارتفاع العرض (وذلك بسبب ظهور الولايات المتحدة مجدداً كأكبر منتج للنفط في العالم بشكل رئيس، بفضل الزيادات السريعة في إنتاج النفط من الصخر الزيتي (الطَفَل) بطريقة التكسير الهيدروليكي) عكس اتجاه ارتفاع الأسعار بشكل حاد. إلا أن هذه المرة ظهر اختلاف أساسي، حيث قرر القادة السعوديون الإبقاء على الإنتاج عند حدوده القصوى بدلاً من خفضه ودعم سعره كما في السابق، وذلك لحماية حصة البلد في السوق العالمية. مرة أخرى حملت القرارات التي اتخذها ثلة من الرجال تبعات أصابت الاستقرار السياسي في البلدان التي تعتمد بدرجة كبيرة على صادرات النفط، وفي البلدان الأخرى المنتجة للنفط غير الأعضاء في منظمة أوبك، بما فيها الولايات المتحدة وكندا.

حمل تراجع أسعار النفط مرة أخرى توقعات بقرب نهاية منظمة أوبك - إلا أن خصوصيات التوزيع المتفاوت لاحتياطي النفط الخام (وكان أحد المخاوف الاستراتيجية الأساسية في القرن العشرين ولم يفقد أهميته في القرن الحادي والعشرين) ظلت في صالح منتجي الشرق الأوسط. وثمة حالة فريدة في حوض الخليج العربي، إذ إنه يحتوي على 12 من أكبر 15 حقل نفط في العالم، بينما احتوى عام 2015 على نحو 65% من الاحتياطي العالمي من النفط السائل (الشركة البريطانية للنفط 2015). هذا الغنى ربما يفسر استمرار الاهتمام باستقرار المنطقة. إلا أن الرغبة

بالاستقرار تعقدها حالة قريبة من التفكك المزمن لمنطقة تتألف من دول تفصلها حدود عشوائية تمر عبر مجموعة عرقية قديمة ذات كيانات دينية معقدة.

بدأت التدخلات الخارجية الملحوظة في المنطقة في أعقاب الحرب العالمية الثانية مع محاولة استيلاء السوفييت على شمال إيران (1945-1946). وأجرى الأمريكان عملتي إنزال في لبنان في عام 1958 و1982، ليتوقف إصرارهم بعدها إثر تفجير إرهابي وحيد استهدف ثكناتهم في بيروت عام 1983 (هامل 1985). وأقدمت بلدان غربية على إمداد إيران بأسلحة ثقيلة (قبل عام 1979، خلال العقد الأخير من حكم الشاه رضا بهلوي) وكذلك المملكة العربية السعودية، بينما فعل السوفييت الشيء عينه مع مصر وسورية والعراق. واستفاد العراق من القائمة الغربية (أسلحة واستخبارات وقروض) إبان الحرب العراقية الإيرانية (1980-1988). ليصل نمط التدخلات إلى ذروته في عمليتي درع الصحراء وعاصفة الصحراء خلال 1990-1991، اللتين كانتا استجابة جماعية من قبل قوات التحالف بقيادة الولايات المتحدة بقرار من الأمم المتحدة لإخراج العراقيين من الكويت بعد غزوها (معهد الإدارة القانونية 2010).

وإثر تلك الخطوة، أقدم العراق على مضاعفة احتياطي النفط الواقع تحت سيطرته، ليزيده إلى نحو 20% من الإجمالي العالمي. وسبب التقدم العراقي تهديداً خطيراً لحقول النفط السعودية القريبة، ولوجود العائلة المالكة عينها، التي حكمت ربع احتياطي النفط في العالم. إلا أن صدام حسين بقي في السلطة رغم خسارته السريعة، لكن بعد أحداث 11 سبتمبر/أيلول، أدت المخاوف من المزيد من الاعتداءات (المخاوف التي اتضح أنها كانت مغلوطة بعد التأكد لاحقاً من عدم وجود أسلحة دمار شامل في العراق) إلى احتلال الولايات المتحدة للعراق في مارس/آذار 2003، ليعقب ذلك سنوات من الاقتتال الداخلي وخسارة جزء من البلد في نهاية المطاف لمصلحة ما عرف باسم الدولة الإسلامية. لكني سأجادل لاحقاً في هذا الفصل، متفقاً بذلك مع ليسر Lesser أ(1991)، بأن الأهداف المتعلقة بالموارد، التي تأتي ظاهرياً في طليعة الصراعات الشرق أوسطية، قد حُددت تاريخياً وفق أهداف استراتيجية أوسع وليس العكس. وإن إخفاق البلدان العربية الأعضاء في أوبك في تحويل النفط إلى سلاح سياسي (كتنفيذ حظر النفط على الولايات المتحدة وهولندا إثر الحرب العربية الإسرائيلية في أكتوبر/تشرين الأول 1973) لم يكن المثال الأول عن استخدام إمدادات الطاقة لإيصال رسالة إيديولوجية.

استثمرت الطاقة الرمزية للمصباح الكهربائي جهات فاعلة مختلفة كالشركات الأمريكية الكبيرة والحزب النازي الألماني. فقد عرض الصناعيون الأمريكان قوة المصباح لأول مرة خلال العرض الكولومبي في شيكاغو، ثم أغرقوا مراكز المدن الكبيرة بما سمي «بالطرق البيضاء» (ني Nye أ1992)، بينما استخدم النازيون جدراناً من المصابيح تبهر المشاركين في مسيرات جماعية للحزب خلال ثلاثينيات القرن الماضي (سبير Speer أ1970). وكانت التغذية بالكهرباء تجسيداً للأفكار السياسية البائسة على غرار سعي لينين لإقامة دولة شيوعية والصفقة الجديدة لفرانكلين روزفلت. بينما لخص لينين هدفه في شعار مقتضب «الشيوعية تساوي القوة السوفييتية مضافاً إليها التغذية الكهربائية»، في حين بقي تفضيل السوفييت لبناء مشاريع كهرمائية عملاقة قائماً عقب انهيار الاتحاد السوفييتي في الصين ما بعد عهد ماو. ووظف روزفلت المشاركة الفيدرالية في بناء

السدود وتغذية الريف بالكهرباء كوسيلة للتعافي الاقتصادي، حيث كان بعض منها في أكثر مناطق البلد تخلفا (ليلينثال Lilienthal أ1944).

أسلحة وحروب

أضحى إنتاج الأسلحة نشاطا صناعياً رائداً يلقى دعماً كبيراً من الأبحاث المتقدمة، وباتت الاقتصادات الرئيسة كافة مصدرة للأسلحة على أوسع نطاق. لكن ثمة جزءاً يسير فقط من تلك النفقات يمكن تبريره من منطلق الاحتياجات الأمنية الحقيقية، بينما شكَّل الإسراف والاستثمارات في غير موضعها وتوظيف الطاقة المستمدة من مهارة الإنسان - وبخاصة تطوير أسلحة لا علاقة لها بالأشكال الجديدة للحروب (فحروب الدبابات بأعداد كبيرة ليس الطريقة الفضلى للتعامل مع الإرهاب الجهادي) - السمة الأساسية لتاريخ تطوير الأسلحة الحديثة. ولا عجب إن تم تعديل الكثير من التطورات الفنية التي جاءت بها أنواع الوقود ووسائط التحريك الأولية الجديدة لمصلحة استخدامات مدمرة، إذ قامت أولاً بزيادة قوة التقنيات الموجودة ورفع مستوى فعاليتها، لتعطي بعدها إمكانية تصميم فئات جديدة من الأسلحة تتسم بمستوى غير مسبوق من السرعة والمدى والقدرة التدميرية.

وتُوجت هذه الجهود بإنشاء ترسانة نووية هائلة ونشر صواريخ باليستية عابرة للقارات قادرة على ضرب أي هدف على الأرض. أما القدرة التدميرية المتسارعة للأسلحة الحديثة فتتضح جيداً بمقارنة الأسلحة الشائعة خلال منتصف القرن التاسع عشر ونظيرتها في منتصف القرن العشرين مع سلفها قبل نصف قرن. فالفئتان الأساسيتان للأسلحة التي استخدمت خلال الحرب الأهلية الأمريكية (1861-1865) - بندقية مسكيت لجنود المشاة ومدفع قذيفة 12 رطلاً، (كلاهما يزخر عبر السبطانة الملساء) - كانتا شائعتين لدى المحاربين خلال الحروب النابليونية (ميتشل 1931). بالمقابل، ومن بين الأسلحة التي سادت في ساحات المعارك إبان الحرب العالمية الثانية - الدبابات والطائرات المقاتلة والقاذفات، وحاملات الطائرات والغواصات - كانت الغواصات فقط هي الموجودة خلال تسعينيات القرن التاسع عشر، لكنها كانت في مراحلها التجريبية الأولى. أما الطريقة التي توضح البعد الفعال لتلك التطورات فتكمن في مقارنة القدرة الحركية والتفجيرية للأسلحة شائعة الاستخدام.

وكمنطلق لإجراء النوع الأول من المقارنة، من المفيد أن نذكر (كما بيننا في الفصل الرابع) أن الطاقة الحركية لأبرز سلاحين محمولين باليد خلال الفترة السابقة للعصر الصناعي السهام (التي تقذف من القوس) والسيوف كانت مجرد 101 جول (ومعظمها كان بين 15 و75 جول)، وأن السهم الذي يُطلق من قوس ثقيل قد يصيب الهدف بطاقة حركية تبلغ 100 جول. بالمقابل، تبلغ قيمة الطاقة الحركية للرصاص المقذوف من سبطانة المسكيت والبنادق الأخرى 103 جول (أي أعلى بـ 10 إلى 100 ضعف)، بينما قذائف المدافع الحديثة (بما فيها مدافع الدبابات) فتبلغ طاقتها الحركية 106 جول. وتوضح حسابات بضعة أسلحة نوعية في المربع 6-13، حيث تقتصر القيم

المعطاة لقذائف المدافع على الطاقات الحركية للمقذوفات من دون الطاقة الحركية للمتفجرات التي قد تكون مزودة بها أو لا.

تُحدث الصواريخ والقذائف، المدفوعة بوقود صلب أو سائل، معظم الأضرار الناجمة عنها بفعل انفجار رؤوسها الحربية، لا بفعل طاقتها الحركية. لكن عند عدم انفجار أول قذائف V-1 الألمانية (غير الموجهة)، كانت الطاقة الحركية للصدمة الناجمة عنها بين 15-18 ميغا جول. ولعل أحدث مثال معروف عن استخدام جسم ما للطاقة الحركية بهدف إحداث ضرر استثنائي كان بتوجيه طائرتي بوينغ عملاقتين (767 و757) نحو برجي مركز التجارة العالمي من قبل مختطفين جهاديين للطائرتين في 11 سبتمبر/أيلول 2001. لقد كان البرجان مصممين لامتصاص اصطدام طائرة نفاثة بهما، لكن فقط في حالة الطيران البطيء (80 م/ثا) لطائرة بوينغ 707 تائهة عند اقترابها من مطار نيوآرك أو لاجوارديا أو جون كينيدي. لقد كانت الطائرة بوينغ 767-200 أثقل بنحو 15% فقط من طائرة 707، إلا أن هذه الطائرة اصطدمت بالبرج بسرعة لا تقل عن 200 م/ثا، ما جعل طاقتها الحركية أعلى بست مرات (قرابة 3.5 جيغا جول مقابل نحو 480 ميغا جول).

مع ذلك، لم ينهر المبنيان بفعل الصدم الناجم عن الطائرتين اللتين كانتا أشبه برصاصتين تضربان شجرة عملاقة. إذ لم يكن بإمكانهما دفع البنية الضخمة للمبنيين، بل اخترقتاهما بتدمير الأعمدة الخارجية أولاً. وقد بين كريم Karim وفات Fatt أ(2005) أن 46% من الطاقة الحركية الأولية للطائرة استخدم في إحداث الأضرار التي لحقت بالأعمدة الخارجية، التي لم تكن لتدمر لو كانت بسماكة 20 مم كحد أدنى. وبالتالي حدث انهيار البرجين نتيجة احتراق الوقود (الذي زاد على 50 طناً من الكيروسين أو 2 تيرا جول)، وكذلك المواد القابلة للاشتعال داخل المبنيين، ما تسبب في إضعاف حراري للهيكل الفولاذي وتسخين غير متجانس لعوارض الأرضيات الطويلة، التي أسهمت في انهيار للأرضيات، وبالتالي انهيار البرجين بسرعة السقوط الحر خلال 10 ثوانٍ تقريباً (إيجر Eagar وموسو Musso أ2001).

بدأت الطاقة التفجيرية للأسلحة الحديثة تشهد زيادة مع اختراع مركبات أقوى من البارود، تغذى بالأكسجين، إلا أن سرعة انفجارها الكبيرة تولد موجة صدمة. وقد أعدت هذه الطائفة من المواد الكيميائية من خلال نترجة مركبات عضوية كالسلولوز والغليسيرين والفينول والتولوين (اوربانسكي Urbanski أ1967). وحضر أسكانيو سوبريرو Ascanio Sobrero النتروغليسيرين عام 1846، وعرض ج. ف. شولتز J. F. E. Schultze النتر وسليلوز عام 1865، إلا أن النتروغليسيرين لم يستخدم عملياً إلا من خلال اختراعي ألفريد نوبل: خلط المركب مع تراب المشطورات (مادة نفوذة خاملة) لصناعة الديناميت وتقديم متفجر عملي عرف باسم مفجر

المربع 6-13

الطاقة الحركية للمقذوفات ذات الحركة الدورانية بفعل المتفجرات

السلاح	المقذوف	الطاقة الحركية (جول)
بندقية المسكيت خلال الحرب الأهلية	رصاصة	1 ×ا 10^{3}
بندقية هجومية (M16)	رصاص	2 ×ا 10^{3}
مدفع القرن الثامن عشر	كرة حديدية	300 ×ا 10^{3}
سلاح مدفعية خلال الحرب العالمية الأولى	قذيفة شظوية	1 ×ا 10^{6}
مدفع AA الثقيل خلال الحرب العالمية الثانية	قذيفة شديدة الانفجار	6 ×ا 10^{6}
دبابة أبرام M1A1	قذيفة يورانيوم منضب	6 ×ا 10^{6}

نوبل (فانت 2014).

وتصل سرعة انفجار البارود، تبعاً لتركيبته، إلى بضع مئات الأمتار في الثانية، بينما تصل في الديناميت حتى 6.800 م/ثا. أما ثلاثي نترو التولوين (TNT) فقد ركبه جوزيف ويلبراند Joseph Wilbrand عام 1863، حين استخدم كمادة متفجرة (بسرعة انفجار تبلغ 6.700 م/ثا) في نهاية القرن التاسع عشر، بينما المادة المتفجرة الأقوى التي تأتي قبل القوة النووية والتي تعرف باسم سيكلونيت (ثلاثي ميثيل الإنترنيترامين الحلقي cyclotrimethylenetrinitramine أو RDX، المتفجر الملكي، بسرعة انفجار تبلغ 8.800 م/ثا) فقد صنعت لأول مرة على يد هانز هينيج عام 1899. وتستخدم هذه المتفجرات منذ ذلك الوقت في قذائف المدفعية والألغام والطوربيدات والقنابل، وكذلك بحزمها على أجسام الانتحاريين خلال العقود الأخيرة. إلا أن كثيراً من الهجمات الإرهابية باستخدام السيارات والشاحنات المفخخة

نفذت باستخدام خليط من السماد الشائع (نترات الأمونيوم) وزيت الوقود وحسب، إذ يتألف هذا الخليط المعروف اختصارا بـ ANFO من NH_4NO_3 بنسبة 94% (كمادة مؤكسدة) و6% من زيت الوقود، وهما مكونان متوافران بشكل جاهز، حيث يكون تأثير هذه التركيبة وفقاً لكتلة المتفجر المستخدم، وليس لسرعة انفجارها الاستثنائية (المربع 6-14).

أدت توليفة المتفجرات الدافعة للصواريخ والفولاذ عالي النوعية إلى زيادة مدى المدافع الميدانية والبحرية من أقل من 2 كم خلال ستينيات القرن التاسع عشر إلى ما يزيد على 30 كم بحلول عام 1900. كما أن توليفة المدافع بعيدة المدى والدروع الثقيلة والعنفات البخارية المخصصة لدفع السفن قد مكنت من صناعة بوارج جديدة ثقيلة، حيث كانت البارجة صاحبة الجلالة *Dreadnought* التي دخلت الخدمة عام 1906 الأنموذج الأولي لها (بليث ولامبيرت وروجر 2011). إذ عملت البارجة على طاقة العنفات البخارية (التي أدخلتها البحرية الملكية عام 1898)، شأنها في ذلك شأن كبريات السفن المخصصة للمسافرين كافة خلال السنوات التي سبقت الحرب العالمية الأولى، والتي بدأت عام 1907 بالسفينتين *Mauretania* و*Lusitania*، والتي تعادل اليوم حاملات الطائرات التي تعمل بالطاقة النووية من فئة نيميتز (سميل 2005). ومن بين الابتكارات التدميرية الملحوظة خلال فترة ما قبل الحرب العالمية الأولى المدافع الآلية والغواصات والنماذج الأولية الأولى للطائرات الحربية. وما زاد من تردي مأزق الخنادق المخيف خلال الحرب العالمية الأولى الانتشار الهائل للمدافع الميدانية الثقيلة والمدافع الآلية ومنصات إطلاق الهاون. فلا الغازات السامة (التي استخدمت أول مرة عام 1915) ولا استخدام الطائرات الحربية والدبابات على نطاق واسع لأول مرة (عام 1916 وبشكل كبير عام 1918) استطاعت كسر تماسك القوة النارية الهائلة التي انتشرت في الهجوم على الجبهات (بيشوب Bishop 2014أ).

شهدت سنوات ما بين الحربين العالميتين تطوراً سريعاً للدبابات والطائرات المقاتلة والقاذفات. وحلت الهياكل المعدنية الكاملة محل البنى المكونة من أخشاب وقماش وأسلاك، لتظهر أولى حاملات الطائرات التي صنعت لهذا الغرض عام 1922 (بولمار Polmar 2006أ). وقد بدأت هذه الأسلحة في الهجوم إبان الحرب العالمية الثانية. أما النجاحات الألمانية الأولى فتعود إلى عمليات الاختراقات السريعة التي تقودها

المربع 6-14
الطاقة الحركية للمتفجرات

جهاز التفجير	المادة المتفجرة	الطاقة (جول)	الحركية

قنبلة يدوية	TNT	2×10^6
انتحاري يلبس حزاماً ناسفاً	RDX	100×10^6
شظية مدفع خلال الحرب العالمية الثانية	TNT	600×10^6
شاحنة مفخخة (500 كغ)	ANFO	2×10^9

الدبابات، والهجوم المباغت الياباني على بيرل هاربور بتاريخ 7 ديسمبر 1941، الذي ما كان ليحدث لولا المقاتلات بعيدة المدى (ميتسوبيشي A6M2 زيرو، بمدى 1.867 كم) والقاذفات Aichi أA2أ3 بمدى 1.407 كم، وNakajima B5N2 بمدى 1.093 كم) التي أطلقت من قوة حاملة ضخمة (هويت Hoyt أ2000، مجتمع ناشونال جيوغرافي 2001؛ سميل 2015).

كانت الأسلحة من الفئات عينها أساساً في هزيمة قوى المحور. إذ كانت في البداية توليفة من طائرات مقاتلة ممتازة (سوبر مارين سبيتفاير Supermarine Spitfires وهوكر هاريكاينز Hawker Hurricanes) والرادارات خلال معركة بريطانيا في أغسطس/آب وسبتمبر/أيلول 1940 (كولير Collier أ1962؛ هاو Hough وريتشاردز Richards أ2007) تلاها بعد ذلك الاستخدام الفعال للطائرات المنقولة على الحاملات (بدءاً من معركة ميد واي الحاسمة عام 1942) والتفوق الساحق للدبابة السوفييتية (طراز T-42) خلال اندفاع الجيش الأحمر باتجاه الغرب. إلا أن سباق التسلح الذي أعقب الحرب بدأ فعلياً خلال الحرب مع تطوير الدفع النفاث، وإطلاق الصواريخ البالستية الألمانية (استخدم V-2 أول مرة عام 1944) والانفجار التجريبي لأول قنبلتين نوويتين في موقع ترينيتي بولاية نيومكسيكو، بتاريخ 11 يوليو، وقصف هيروشيما بتاريخ 6 أغسطس/آب 1945، وناغازاكي بعدها بثلاثة أيام، حيث كان إجمالي الطاقة الناتجة عن هاتين القنبلتين النوويتين أعلى بقيم أسية قياساً بالأسلحة الانفجارية السابقة - لكنها أيضاً كانت أدنى بقيم أسية من تصاميم القنبلة الهيدروجينية التي ظهرت لاحقاً.

أطلق أول مدفع ميداني حديث، وهو المدفع الفرنسي عيار 75 مم طراز عام 1897، قذائف معبأة بنحو 700 غ من حمض البكريك، الذي وصلت طاقته التدميرية إلى 2.6 ميغا جول (بينوا Benoît أ1996). لعل أفضل المدافع المعروفة خلال الحرب العالمية الثانية كان مضاد الطائرات الألماني فلا- ك (*Flugzeugabwehrkanone*) أ18، الذي استخدمت نسخة عنه أيضاً في دبابات تايجر Tiger (هوج Hogg أ1997) وكان يطلق قذائف شظوية بلغت طاقتها

الانفجارية 4 ميغا جول. إلا أن أقوى المتفجرات التي استعملت خلال الحرب العالمية الثانية كان القنابل الضخمة التي ألقيت على المدن وأقواها القنابل التي حملتها طائرة «الحصن الطائر» (بوينغ B-أ17) بطاقة انفجارية بلغت 3.8 جيغا جول. في حين نجمت أعظم الأضرار عن إسقاط القنابل الحارقة على طوكيو في يومي 9-10 مارس/آذار 1945 (المربع 6-15، الشكل 6-21).

حررت القنبلة التي ألقيت على هيروشيما 63 تيرا جول من الطاقة، نصفها من الانفجار و35% كإشعاع حراري (مالك 1985)، حيث لقي عدد كبير من السكان حتفهم على الفور نتيجة هذين التأثيرين، بينما تسبب الإشعاع المؤين بأضرار مباشرة وأخرى ظهرت لاحقاً. انفجرت القنبلة الساعة 8:15 صباحاً بتاريخ 7 أغسطس/آب 1945 بعد إلقائها من ارتفاع 580 م تقريباً فوق سطح الأرض، لتبلغ درجة الحرارة عند نقطة الانفجار ملايين الدرجات المئوية، قياساً بحرارة المتفجرات التقليدية البالغة 5.000 درجة مئوية. وبلغت كرة النار مداها الأقصى وهو 250 م خلال ثانية واحدة، وبلغت سرعتها القصوى تحت مركز الانفجار 440 م/ثا، في حين وصل الضغط الأعظمي إلى 3.5 كغ/سم^2 (اللجنة المعنية بتجميع المواد 1991). أما قنبلة ناغازاكي فحررت نحو 92 تيرا جول.

المربع 6-15

إلقاء القنابل الحارقة على طوكيو بتاريخ 9-10 مارس/آذار 1945

قامت 334 قاذفة من طراز B-29 بتنفيذ أكبر غارة من نوعها، حيث ألقت بحمولتها من علو منخفض (600-750 م) (كايدين Caidin أ1960؛ هويت Hoyt أ2000). وكانت معظم القنابل التي ألقيت قنابل عنقودية كبيرة الحجم بوزن 240 كغ، حيث تحرر كل منها 39 قنبلة حارقة M-69 مملوءة بالنابالم، وخليط من البوليستيرين والبنزين والجازولين (موشروش Mushrush وآخرون 2000)؛ كما استخدمت قنابل الجازولين الهلامي والفوسفور البسيطة التي بلغ وزنها 45 كغ. وأسقط نحو 1.500 طن من المركبات الحارقة على المدينة، حيث وصل إجمالي محتواها من الطاقة (إذا ما افترضنا معدل كثافة النابالم 42.8 جيغا جول/طن) إلى نحو 60 تيرا جول، أي تعادل قوة القنبلة التي ألقيت على هيروشيما تقريباً.

إلا أن الطاقة التي حررت من النابالم الحارق كانت مجرد جزء من إجمالي الطاقة المحررة من المباني الخشبية المحترقة في المدينة. ووفقاً لما جاء عن قسم شرطة مدينة طوكيو الكبرى، دمرت النيران 286.358 مبنى ومنشأة (المسح الأمريكي الاستراتيجي للقصف 1947)، أما الافتراضات المتحفظة (250.000 مبنى خشبي، بكمية 4 أطنان خشب للمبنى، 18 جيغا جول/طن من الخشب الجاف) فتقول بإطلاق نحو 18 بيتا جول من الطاقة جراء احتراق المنازل الخشبية للمدينة، أي أعلى بقيمتين أسيتين (300 ضعف) من الطاقة الناتجة عن القنابل الحارقة. ووصلت المساحة المدمرة إلى نحو 4.100 هـ، وقتل ما لا يقل عن 100.000 شخص.

وللمقارنة، كانت إجمالي المساحة المدمرة في هيروشيما قرابة 800 هـ، في حين بلغت حالات الموت الفوري وفق أفضل التقديرات 66.000 شخص.

قد تبدو هذه الأسلحة صغيرة قياساً بالقنبلة الحرارية النووية الأقوى، والتي اختبرها الاتحاد السوفييتي فوق نوفايا زمليا بتاريخ 30 أكتوبر/تشرين الأول 1961، فقد حررت القنبلة المعروفة باسم قنبلة القيصر 209 بيتا جول من الطاقة (خالتورين Khalturin وآخرون 2005). وبعد أقل من 15 شهراً كشف نيكيتا خروتشوف



الشكل 6-21

تبعات قصف طوكيو في مارس/آذار 1945 (Corbis).

Nikita Khrushchev عن قيام العلماء الروس بصنع قنبلة أقوى بمرتين. ولا يستخدم الجول عادة لدى مقارنة شدة الإنفجار، لكن وفق واحدات مكافئ TNT أ(1 طن TNT = أ4.184 جيغا جول)، فإن قنبلة هيروشيما كانت تكافئ 15 ك طن TNT. أما قنبلة القيصر فتكافئ 50 ميغا طن TNT. وتبلغ قوة الرؤوس الحربية على الصواريخ العابرة للقارات بين 100 ك طن و1 ميغا طن، لكن من الممكن لهذه الصواريخ مثل صاروخ بوسايدون الذي أطلقته غواصة أمريكية أو الغواصة الروسية SS- 11 أن تحمل حتى 10 منها. وللتأكيد على قوة تحرير الطاقة لا أستخدم الصيغة العلمية (الأسس) في السلم المتصاعد للقوة التدميرية القصوى للأسلحة المتفجرة (المربع 6-16).

خزنت القوتان العظميان النوويتان في نهاية المطاف نحو 5.000 رأس حربي نووي (وترسانة تزيد على 15.000 رأس حربي نووي آخر قابلة للتحميل على صواريخ أقصر مدى) تصل قدرتها التدميرية إلى نحو 20 إكسا جول. لا شك في أنها طريقة تدمير مفرطة على نحو لا يقبله عقل. فها هو فكتور فايسكوبف (1983، 25) يشير إلى أن «الأسلحة النووية ليست أسلحة للحرب. فالغاية الوحيدة منها امتلاكك قوة تردع فيها الطرف الآخر عن استخدامها، لذلك فإن العدد القليل منها يكفي». مع ذلك، فإن هذا العدد المفرط خدم الغرب جيداً كسلاح ردع قوي منع حرباً نووية عالمية لا يمكن لأي طرف الانتصار فيها.

إلا أن تطور الأسلحة النووية فرض أعباء هائلة على الخزائن الوطنية نظراً لما يتطلبه من استثمار ضخم وكميات كبيرة جداً من الطاقة ينفق معظمها على فصل النظائر الانشطارية لليورانيوم (كيساريس Kesaris أ1977؛ الجمعية النووية العالمية 2015أ). وتطلب الانتشار الغازي قرابة 9 جيغا جول/وحدة عمل منفصل، إلا أن محطات الطرد المركزي الغازي لا تحتاج إلا إلى 180 ميغا جول/وحدة عمل منفصل، مع الحاجة إلى 227 وحدة عمل منفصل لإنتاج كيلوغرام واحد من اليورانيوم من المخصص للأسلحة، حيث تعمل النسبة الأخيرة حتى 41 جيغا جول/كغ تقريباً. كما تألفت الوسائط الثلاثة المخزنة لإنتاج رؤوس حربية نووية - قاذفات بعيدة المدى، صواريخ باليستية عابرة للقارات، وغواصات نووية - من وسائط تحريك أساسية (محركات نفاثة وصاروخية) وبنى تطلب إنتاجها وتشغيلها كثافة طاقة مرتفعة.

كما يتطلب إنتاج الأسلحة التقليدية مواد تستخدم الطاقة استخداماً كثيفاً حيث يغذى استعمالها بطاقة الوقود الأحفوري الثانوية (وقود البنزين والكيروسين والديزل) وتستخدم الكهرباء لتغذية الآلات التي تحملها، وتقديم المعدات والمؤن للجنود العاملين على تشغيلها. فبينما يمكن إنتاج الفولاذ العادي من فلزات الحديد وحديد الصب بكمية ضئيلة من الطاقة تبلغ 20 ميغا جول/كغ، يتطلب إنتاج الفولاذ الخاص المستخدم في المعدات الثقيلة المدرعة 40-50 ميغا جول/كغ، في حين أن

استخدام اليورانيوم المنضب (للقذائف الخارقة للدروع وتعزيز حماية الدروع) فيستلزم طاقة أكثر كثافة. ويتطلب الألمنيوم والتيتانيوم (وخلائطهما)، وهما المادتان

المربع 16-6
الطاقة العظمى للأسلحة المتفجرة

العام	السلاح	الطاقة (جول)
1900	قذيفة محشوة بالكبريت من مدفع فرنسي عيار 75 مم عام 1897	2.600.000
1940	قذيفة شظوية محشوة أماتول/TNT تطلق من مضاد الطائرات الألماني «فلاك» عيار 88 مم	4.000.000
1944	أكبر قنبلة حملتها القاذفة بوينغ B-17	3.800.000.000
1945	قنبلة هيروشيما	63.000.000.000.000
1945	قنبلة ناغازاكي	92.400.000.000.000
1961	قنبلة القيصر السوفييتية التي اختبرت عام 1961	209.000.000.000.000.000

الأساسيتان المستخدمتان في صناعة الطائرات الحديثة، بين 170 و250 ميغا جول/كغ (للألمنيوم) و450 ميغا جول/كغ (للتيتانيوم)، بينما تتطلب الألياف المركبة الخفيفة والقوية في

العادة ما بين 100 و150 ميغا جول/كغ.

من الواضح أن هذه الآليات المتينة والحديثة مصممة لتعطي الأداء الأمثل في المعارك، لا للحد من استهلاك الطاقة، وهي تستهلك الطاقة بكثافة بشكل استثنائي. على سبيل المثال، تعمل الدبابة M1/A1 أبرامز التي يبلغ وزنها 60 طناً والمخصصة للمعارك الأساسية بعنفة غازية Honeywell 1500-AGTأ استطاعتها 1.1 ميغا واط وتستهلك (تبعاً للمهمة والتضاريس والطقس) 400-800 ل/100 كم (تكنولوجيا الجيوش 2015). ولو ضربنا مثالاً للمقارنة لوجدنا أن سيارة مرسيدس كبيرة من فئة S600 تحتاج إلى نحو 15 ل/100 كم، بينما ترتشف هوندا سيفيك 8 ل/100 كم. ويتطلب الطيران بسرعات أعلى من سرعة الصوت (حتى 1.6-1.8 ماخ) بطائرات قتالية قادرة على المناورة مثل F-16 وفايتنج فالكون من لوكهيد، وF/A-18 ومكدونل دوغلاس وهورنت الكثير من الوقود المخصص للطيران، حيث لا يمكن تمديد مهامها إلا بتزويدها بالوقود في أثناء الطيران بوساطة طائرات ضخمة ناقلة للوقود، مثل KC-10 وKC-135 وبوينغ 767.

يعد استخدام الأسلحة وفق تشكيلات ضخمة من الملامح الأخرى للحروب الحديثة التي تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة. في عام 1918 اشتركت 600 آلية تقريباً في أكثر الهجمات المركزة بالدبابات (نماذج خفيفة نسبياً في تلك الفترة)، لكن بالمقابل، نشر الجيش الأحمر نحو 8.000 دبابة، و11.000 طائرة، وأكثر من 50.000 مدفع ومنصة إطلاق صواريخ خلال الهجوم الأخير على برلين في أبريل/نيسان 1945 (زيمكة Ziemke أ1968). وكمثال عن الكثافة الجوية الحديثة، طارت خلال حرب الخليج (عملية عاصفة الصحراء بين يناير/كانون الثاني- أبريل/نيسان 1991) والأشهر السابقة لها (عملية درع الصحراء، أغسطس/آب 1990 - يناير/كانون الثاني 1991) نحو 1.300 طائرة تجاوز عدد طلعاتها 116.000 طلعة (جلف لينك Gulflink أ1991).

كانت الحاجة إلى مضاعفة إنتاج المعدات العسكرية في فترات زمنية قصيرة إحدى الظواهر الأخرى التي أسهمت إسهاماً كبيراً في إجمالي تكاليف الطاقة. ولعلنا نرى في الحربين العالميتين أفضل الأمثلة على ذلك. ففي أغسطس 1914 لم يكن لدى بريطانيا سوى 154 طائرة عسكرية، لكن بعد أربع سنوات فقط كانت مصانع الطائرات في البلد توظف نحو 350.000 شخص لإنتاج 30.000 طائرة في العام (تايلور 1989). وعندما أعلنت الولايات المتحدة حربها على ألمانيا في أبريل 1917 كانت تملك أقل من 300 طائرة من الدرجة الثانية، عجزت جميعها عن حمل القنابل أو المدافع الآلية، لكن بعد ثلاثة أشهر أقر الكونجرس الأمريكي تخصيصاً غير مسبوق لمبلغ 640 مليون دولار أمريكي (ما يعادل قرابة 12 بليون دولار أمريكي وفق قيمة العملة عام 2015) لصناعة 22.500 محرك من طراز ليبرتي للمقاتلات الجديدة (ديمبسي Dempsey أ2015). ويبقى التسارع الصناعي الأمريكي خلال الحرب العالمية الثانية موضع إعجاب.

وخلال الربع الأخير من عام 1940 لم يتجاوز عدد الطائرات التي تسلمها سلاح الجو الأمريكي 514 طائرة. لكن في عام 1941 وصل إجمالي عددها إلى 8.723 طائرة، ليرتفع إلى 26.448 عام 1942، في حين تجاوز إجمالي عددها 45.000 طائرة عام 1943، بينما شهد عام 1944 استكمال المصانع الأمريكية لـ 51.547 طائرة جديدة (هولي Holley أ1964). وكان إنتاج

الطائرات في أمريكا القطاع التصنيعي الأكبر في الاقتصاد الحربي: فقد وظف مليوني عامل، واستلزم قرابة ربع مجمل النفقات الحربية، حيث أنتج ما مجمله 295.959 طائرة، قياساً بعدد الطائرات البريطانية البالغ 117.479، والألمانية البالغ 111.784 طائرة، واليابانية البالغ 68.057 طائرة (سلاح الجو 1945؛ ينّة Yenne أ2006). وفي نهاية المطاف، جاءت انتصارات الحلفاء نتيجة تفوقهم في تسخير الطاقة التدميرية. فبحلول عام 1944 أنتجت الولايات المتحدة وروسيا والمملكة المتحدة وكندا ثلاثة أضعاف ما أنتجته ألمانيا واليابان من ذخيرة قتالية (جولدسميث 1946). ويمكن إيضاح زيادة القدرة التدميرية للأسلحة وإيصال المتفجرات بتركيز أكبر من خلال مقارنة كلا الحدثين المميزين وإجمالي الخسائر الناجمة عن الصراع (المربع 6-17).

يتطلب حساب تكاليف الطاقة في الصراعات المسلحة الرئيسة تحديدات عشوائية مهمة لما يجب إدخاله في الأعداد الإجمالية المذكورة. بعد كل ذلك، لا تقوم المجتمعات المعرضة لخطر الموت بتشغيل قطاعين مدني وعسكري منفصلين، إذ إن التعبئة الاقتصادية خلال فترات الحرب تؤثر في الأنشطة كافة تقريباً. وتبلغ الأرقام الإجمالية لتكلفة الصراعات الرئيسة خلال القرن العشرين بالنسبة لأمريكا نحو 334 بليون دولار أمريكي بالنسبة إلى الحرب العالمية الأولى، و4.1 تريليون دولار أمريكي بالنسبة إلى الحرب العالمية الثانية، و748 بليون دولار أمريكي إلى الحرب الفيتنامية (1964-1972)، وجميع هذه التكاليف معبر عنها وفق قيمة الدولار الثابتة عام 2011

المربع 6-17

خسائر الحروب الحديثة

وصل إجمالي الخسائر الناجمة عن القتال خلال معركة سوم (يوليو - 19 نوفمبر 1916) إلى 1.043 مليون، بينما تجاوز هذا الرقم 2.1 مليون شخص خلال معركة ستالينغراد (23 أغسطس 1942 - 2 فبراير 1943) (بيفور Beevor أ1998). أما معدل الوفيات في المعارك - المعبر عنه بحالات الموت في كل 1.000 رجل من القوات المسلحة المشاركة في الميدان عند بداية الصراع - فكان أدنى من 200 خلال أول حربين حديثتين اشتركت فيهما القوى الرئيسة (حرب القرم بين 1853-1856 والحرب الفرنسية- البروسية بين عامي 1870-1871)، وتجاوز الرقم 1.500 خلال الحرب العالمية الأولى و2.000 خلال الحرب العالمية الثانية، بينما زاد عن 4.000 بالنسبة إلى روسيا (سينجر وسمول 1972). وخسرت ألمانيا نحو 27.000 مقاتل في المليون شخص خلال الحرب العالمية الأولى، لكنها خسرت ما يزيد على 44.000 مقاتل خلال الحرب العالمية الثانية.

وازدادت الخسائر بين المدنيين خلال الحروب الحديثة بوتيرة أسرع. فخلال الحرب العالمية الثانية وصلت إلى نحو 40 مليون، ما شكل نسبة تزيد على 70% من إجمالي الخسائر البالغة

55 مليون. وتسبب قصف المدن الكبيرة بخسائر فادحة خلال أيام أو حتى ساعات (كلوس Kloss أ1963؛ ليفين Levine أ1992). فقد وصل إجمالي الخسائر الناجمة عن القصف الألماني إلى قرابة 600.000 قتيل ونحو 900.000 جريح. وقتل نحو 100.000 شخص في الغارات التي نفذتها قاذفات B-29 ليلاً، والتي سوّت بالأرض مساحة وصلت إلى قرابة 83 كم^2 من المدن اليابانية الرئيسة الأربع بين 10 و20 مارس/آذار 1945. وكنا قد عرضنا آنفاً وصفاً لتأثيرات قصف طوكيو بالقنابل الحارقة والهجوم النووي على هيروشيما (انظر المربع 6-15).

(داغيت 2010). ولعل التعبير عن هذه التكاليف وفق القيمة الراهنة للعملة وضربها الإجمالي بمعدلات كثافات الطاقة السائدة لإجمالي الناتج المحلي للبلد بعد تعديلها سيعطي قيما تقريبية مبررة للحد الأدنى لتكاليف الطاقة الناجمة عن تلك الصراعات.

وتعتبر التعديلات مطلوبة نظراً لأن إنتاج الصناعة والنقل خلال فترات الحرب استهلك طاقة أكبر في وحدة مخرجاتها قياساً بوحدة إجمالي الناتج المحلي خلال الفترات العادية. وكأرقام تقريبية، اخترت الأعداد المكررة التالية 1.5 و2 و3 للصراعات الثلاثة. نتيجة ذلك، تطلبت المشاركة في الحرب العالمية الأولى نحو 15% من إجمالي استهلاك الطاقة الأمريكية عام 1917 و1918، ووصل متوسط الاستهلاك نحو 40% في الحرب العالمية الثانية، لكنه لم يتجاوز 4% خلال سنوات الحرب الفيتنامية. وكانت النسب العظمى أعلى بشكل واضح، حيث تراوحت بين 54% بالنسبة إلى الولايات المتحدة عام 1944 و76% بالنسبة إلى الاتحاد السوفييتي عام 1942 مع نسبة مماثلة لألمانيا عام 1943.

ليس ثمة علاقة واضحة بين الاستخدام الكلي للطاقة والنجاح في شن أعمال عدوانية حديثة (أو منعها). أما الحالة الأوضح للارتباط الإيجابي بين إنفاق الطاقة والانتصار السريع نوعاً ما فيكمن في التعبئة الأمريكية للحرب العالمية الثانية، والتي غذيت بزيادة قدرها 46% في إجمالي استخدام الطاقة الأولية بين عامي 1939 و1944. لكن وفق المعنى التقليدي كانت هيمنة أمريكا أكبر خلال حرب فيتنام - إذ كانت كمية المتفجرات المستخدمة ثلاثة أضعاف القنابل التي ألقاها سلاح الجو الأمريكي على ألمانيا واليابان في الحرب العالمية الثانية، فضلاً عن امتلاك الولايات المتحدة لأحدث المقاتلات النفاثة والقاذفات والحوامات وحاملات الطائرات وكيماويات إسقاط أوراق النبات - مع ذلك أخفقت في ترجمة تلك الهيمنة إلى انتصار آخر لعدد من الأسباب السياسية والاستراتيجية.

وبالطبع، توضح لنا الهجمات الإرهابية أنْ ليس من علاقة بين الطاقات المنفقة والنتائج المحققة. وخلافا لتجربة الحرب الباردة التي كان إنتاج الأسلحة خلالها باهظاً ومحروساً بعناية من قبل الدول، استخدم الإرهابيون أسلحة رخيصة ومتاحة على نطاق واسع. فبضع مئات الكيلوغرامات من نترات الأمونيوم/زيت الوقود (ANFO) لتفخيخ إحدى الشاحنات، وبضع عشرات

الكيلوغرامات لتفخيخ سيارة، أو حتى بعض الكيلوغرامات للمواد شديدة الانفجار (التي تعلوها قطع معدنية) والمثبتة على أجسام الانتحاريين كانت تكفي لقتل العشرات أو حتى المئات (ففي عام 1983 قتلت شاحنتان 307 أشخاص، معظمهم من الموظفين الأمريكان، في ثكناتهم في بيروت) وأصابت كثيراً غيرهم، فضلاً عن إرهاب الفئة المستهدفة.

لم يكن لدى 19 خاطفاً في 11 سبتمبر/أيلول أي سلاح سوى بعض المشارط، حيث كلفت كامل العملية، بما فيها دروس الطيران، أقل من 500.000 دولار أمريكي (بن لادن bin Laden أ3، 2004) - بينما بلغت التكلفة المباشرة للعبء المالي (بحسب تقرير المراقب المالي لمدينة نيويورك الصادر بعد عام عن الهجوم) على أقل تقدير 95 بليون دولار أمريكي، بما في ذلك نحو 22 بليون دولار أمريكي لاستبدال المبنيين والبنى التحتية و17 بليون دولار أمريكي مقابل الأجور الضائعة (تومبسون Thompson أ2002). أما المنظور الوطني لتقييم إجمالي الناتج المحلي الضائع، وتراجع قيم الأسهم، والخسائر التي تكبدتها صناعات الطيران والسياحة، وارتفاع معدلات التأمين والشحن، وزيادة الإنفاق على قطاعي الأمن والدفاع فيرفع التكاليف إلى ما يربو على 500 بليون دولار أمريكي (لووني Looney أ2002). وإذا ما أضفنا التكلفة الجزئية لاحقاً المتمخضة عن غزو العراق واحتلاله وجدنا أن إجمالي التكلفة سيزيد بشكل كبير على تريليون دولار أمريكي، حيث بينت التجربة إثر الهجوم أنه لا حل عسكرياً سهل، إذ يبقى استخدام الأسلحة الفتاكة التقليدية وأحدث الأسلحة الذكية محدوداً أمام أفراد وجماعات متعصبة راغبة في الموت عن طريق هجمات انتحارية.

لا شك في أن مفهوم الدمار المتبادل المؤكد هو السبب الرئيس وراء عدم خوض القوتين العظميين النوويتين حرباً نووية، لكن في الوقت عينه، تجاوزت قوة المخزون النووي الذي يتراكم لدى الخصوم، وما يلحق به من تكاليف مرتبطة بالطاقة، مستوى الردع العقلاني الذي يمكن الدفاع عنه. فكل خطوة نحو تطوير الرؤوس النووية وحاملاتها (كالقاذفات عابرة القارات والصواريخ الباليستية والغواصات التي تعمل بالطاقة النووية) ونشرها وحمايتها وصونها يتطلب كثافة طاقة مرتفعة. أما القيمة الأسية وفق التقديرات فهي أن ما لا يقل عن 5% من إجمالي الطاقة التجارية الأمريكية والسوفيتية قد استهلك بين 1950 و1990 بدعوى تطوير وتخزين تلك الأسلحة ووسائط حملها (سميل 2004).

لكن حتى لو كان العبء أكبر بمرتين، بوسعنا القول جدلاً إن التكلفة مقبولة قياساً بتكلفة التراشق النووي، حتى وإن كان تراشقاً محدوداً، الذي كان سيوقع عشرات الملايين من الضحايا جراء التأثيرات المباشرة للانفجار والحرائق والإشعاع المؤين (سلمون Solomon ومارستون Marston أ1986). فالتراشق النووي بين الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي المحدود باستهداف مرافق استراتيجية في أواخر ثمانينيات القرن الفائت كان سيؤدي إلى قتل 27 مليون شخص كحد أدنى، وربما وصل العدد إلى 59 مليون قتيل (فون هيبل von Hippel وآخرون 1988). وقد عمل هذا التوقع كرادع قوي جداً عن إطلاق أول هجوم، وعن التفكير جدياً بذلك بعد ستينيات القرن الفائت.

لكن ما يؤسف له أن التكلفة المنسوبة إلى الأسلحة النووية لن تتوقف حتى مع إلغائها الفوري، إذ إن نزع أجهزة التفجير من هذه الأسلحة، وأعمال الحماية باهظة التكاليف، وتنظيف مواقع الإنتاج الملوثة سوف تستمر على مدى عقود، مع ارتفاع متوقع للتكاليف الأمريكية المتعلقة بهذا الشأن. وستكون التكلفة أكبر عند تنظيف مواقع الأسلحة النووية الملوثة بشكل أكبر في بلدان الاتحاد السوفيتي سابقاً. لحسن الحظ، يمكن خفض تكاليف وقف تشغيل الرؤوس الحربية النووية بدرجة أكبر من خلال إعادة استخدام المادة الانشطارية المستردة في توليد الكهرباء (الجمعية النووية العالمية 2014).

يدمج اليورانيوم عالي التخصيب (الذي يحتوي على ما لا يقل عن 20% وحتى 90% يورانيوم-235) مع اليورانيوم المنضب (يورانيوم -238 بمعظمه) واليورانيوم الطبيعي (0.7% يورانيوم-235) أو اليورانيوم جزئي التخصيب لإنتاج يورانيوم منخفض التخصيب (<5% يورانيوم-235) المستخدم في مفاعلات الطاقة. وبحسب اتفاق عام 1993 بين الولايات المتحدة وروسيا (ميغا أطنان مقابل ميغا واطات)، حولت روسيا 500 طن من اليورانيوم عالي التخصيب من رؤوسها الحربية ومخزونها الاستراتيجي (الذي يكافئ نحو 20.000 قنبلة نووية) إلى وقود جاهز للمفاعل (بمعدل نحو 4.4% يورانيوم-235) وباعته لتغذية المفاعلات المدنية الأمريكية.

لا أستطيع أن أختم هذا القسم الخاص بالطاقة من دون ذكر بعض الملحوظات عن الطاقة كسبب لاندلاع الحرب. فالاعتقاد بوجود هذه العلاقة بقي شائعاً جداً، وكان التفاعل الأخير بينهما في الغزو الأمريكي للعراق عام 2003، والذي نُفذ - وكلنا على يقين - للاستيلاء على نفطه. وبالنسبة إلى المؤرخين، كان المثال الذي يذكر عن هذه العلاقة هو الهجوم الياباني على الولايات المتحدة في ديسمبر 1941 بعد قيام إدارة روزفلت أولاً بإلغاء معاهدة عام 1911 الخاصة بالتجارة والملاحة (في يناير 1940)، ثم التوقف عن إصدار تراخيص تصدير بنزين الطيران وأدوات الآلات (في يوليو 1940)، وأعقب ذلك حظر تصدير حديد الخردة والفولاذ (في سبتمبر 1940). وهكذا، وبحسب المبررات اليابانية التي لم تتخل عنها حتى الآن، لم يعد أمام ذلك البلد من خيار سوى الهجوم على الولايات المتحدة لتكون له بعدئذ حرية الهجوم على جنوب شرق آسيا والاستيلاء على ما في المنطقة من حقول النفط في سومطرة وبورما.

إلا أن حادثة بيرل هاربور سبقها قرابة عقد من السياسة العسكرية الباهظة التكلفة، حيث بدأت بفتح منشوريا عام 1933 والتصعيد بهجومها على الصين عام 1937: إذ كان بوسع اليابان الاستمرار في الحصول على النفط الأمريكي لو أنها تخلت عن سياستها العدوانية ضد الصين (إيناجا Ienaga أ1978). ولا عجب أن كتب ماريوس جانسن، أحد أشهر المؤرخين في اليابان الحديثة، عن طبيعة المواجهة الغريبة مع الولايات المتحدة التي جعلت اليابان تلحق بنفسها خسائر فادحة (جانسن Jansen أ2000). فمن يدعي أن الهجمات المتسلسلة التي نفذها هتلر - ضد تشيكوسلوفاكيا (في عامي 1938 و1939) وبولندا (عام 1939) وأوروبا الغربية (بدءاً من عام 1939) والاتحاد السوفييتي (1941) - وحرب الإبادة الجماعية التي شنها على اليهود كانت بدافع السعي للسيطرة على موارد الطاقة؟

كما لم توجد أي دوافع متعلقة بالطاقة لشن الحرب الكورية (التي بدأت بأوامر من ستالين) ولا للصراع في فيتنام (محاربة الفرنسيين للمقاتلين الشيوعيين حتى 1954، والولايات المتحدة بين 1964 و1972) والاحتلال السوفيتي لأفغانستان (1979-1989)، أو الحرب الأمريكية ضد طالبان (التي أطلقت في أكتوبر2001) - أو للصراعات العابرة للحدود خلال أواخر القرن العشرين (الصين-الهند، وجولات عديدة بين الهند وباكستان، وإريتريا وإثيوبيا، وغيرها الكثير) أو لاندلاع الحروب الأهلية (كما في أنجولا وأوغندا وسري لانكا وكولومبيا). صحيح أن الحرب النيجيرية مع إقليم بيافرا الانفصالي (1967-1970) والحرب الأهلية التي لا نهاية لها في السودان (والتي تحولت الآن إلى صراع بين السودان وجنوب السودان والحروب القبلية داخل جنوب السودان) ارتبطت بمكون النفط، إلا أن كلا الحربين نشأ بشكل رئيس من عداوات دينية وعرقية، إذ يعود تاريخ بدء الصراع السوداني إلى عام 1956، أي قبل عقود من أي اكتشاف للنفط في تلك المنطقة.

أخيراً، يبقى لدينا حربان يُنظر إلى النفط على أنه السبب الحقيقي وراءهما بشكل كبير. فالغزو العراقي للكويت في أغسطس 1990 ضاعف من احتياطي النفط الخام التقليدي تحت سيطرة صدام حسين وهدد حقول النفط العملاقة في السعودية المجاورة (حقول سفانية، وزلف، ومرجان، ومنيفة على اليابسة وفي البحر جنوب الكويت مباشرة)، فضلاً عن تهديده للنظام الملكي. إلا أنه ثمة دوافع أكبر من السيطرة على النفط، بما فيها السعي العراقي لحيازة أسلحة نووية وغيرها من الأسلحة غير التقليدية (في عام 1990 لم يكن أحد يشك في ذلك) ومخاطر حرب عربية-إسرائيلية أخرى (فالهجمات الصاروخية العراقية على إسرائيل أججت هذا الصراع). فلو كانت السيطرة على موارد النفط هي الهدف الأساس من حرب الخليج عام 1991، إذن لماذا أُمر الجيش المنتصر إيقاف تقدمه المطلق، ولماذا لم يتم على أقل تقدير احتلال أغنى حقول النفط العراقية في الجنوب؟

والسؤال المطروح، ما نتائج الغزو الأمريكي للعراق عام 2003؟ بلغت الواردات الأمريكية من النفط العراقي ذروتها فعلياً عام 2001 عندما كان صدام حسين لا يزال في الحكم، حيث وصلت إلى نحو 41 ميغا طن، إلا أنها استمرت في التراجع المطرد بعد الغزو، حيث انخفض إجمالي الواردات عام 2015 إلى أقل من 12 ميغا طن، أي أن نسبتها لا تصل حتى إلى 3% من إجمالي الواردات الأمريكية (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2016ب) - فتلك الواردات تشهد بالطبع تراجعاً مطرداً بعد أن أعادت طريقة التكسير الهيدروليكي البلد مرة أخرى إلى مرتبة أكبر منتج للنفط الخام وسوائل الغاز الطبيعي على مستوى العالم (الشركة البريطانية للنفط 2016).

تغيرات بيئية

يعد توفير الوقود الأحفوري والكهرباء واستخدامهما أكبر أسباب التلوث بشري المنشأ للغلاف الجوي، كما تعتبر انبعاثات غاز الدفيئة أكبر العوامل المسببة لتلوث المياه والتغيرات في استخدام

الأرض. فحرق أنواع الوقود الأحفوري كافة يشتمل بالتأكيد على أكسدة سريعة لكربونها، ما ينتج انبعاثات متزايدة لغاز ثاني أكسيد الكربون، بينما يطلق غاز الميثان (CH_4)، وهو أحد الغازات القوية المسببة للارتفاع الحروري الأرضي، خلال إنتاج الغاز الطبيعي ونقله؛ كذلك تنطلق كميات ضئيلة من أكسيد النيتروجين (N_2O) جراء حرق الوقود الأحفوري. وظل حرق الفحم مصدراً كبيراً للجسيمات وأكسيد الكبريت وأكسيد الآزوت (SO_x وNO_x)، إلا أن الانبعاثات الساكنة لتلك الغازات باتت اليوم مضبوطة بشكل كبير بالمحرضات الكهربائية الساكنة وعمليات نزع الكبريت ونزع أكسيد الآزوت (سميل 2008أ). مع ذلك، لا تزال الانبعاثات الناجمة عن حرق الفحم تؤثر في الصحة بشكل كبير (لوكوود Lockwood أ2012).

ينجم تلوث المياه بشكل أساسي عن حوادث التسرب النفطية المفاجئة (من الأنابيب وعربات السكك الحديدية والعبّارات وناقلات النفط ومصافي النفط) وكذلك جراء الصرف الحمضي للمناجم. ولعل ما يتسبب بتغيرات استخدام الأراضي بشكل رئيس استخراج الفحم السطحي، والخزانات وراء السدود الرئيسة لتوليد الطاقة الكهرمائية، وممرات ارتفاق أسلاك نقل التوتر العالي، وبناء مرافق كبيرة لتخزين أنواع الوقود السائل وتكريرها وتوزيعها، ومؤخراً إنشاء مزارع ضخمة لتوليد الطاقة من الرياح والطاقة الشمسية. وتعتبر أنواع الوقود والكهرباء مسؤولة على نحو غير مباشر عن الكثير من تدفقات التلوث وتدهور النظام البيئي، لعل أبرزها ناجم عن الإنتاج الصناعي (وعلى رأسه التعدين الحديدي والتركيبات الكيميائية) والمبيدات الكيميائية الزراعية والتحضر والنقل. وتشهد هذه التأثيرات زيادة من حيث نطاقها وكثافتها، محدثة تأثيرات في البيئة تمتد من النطاق المحلي إلى الإقليمي. أما تكاليفها فتجبر الاقتصادات الرئيسة كافة على تكريس اهتمام متزايد لمسألة الإدارة البيئية.

وفي ستينيات القرن الفائت، تمثلت إحدى حالات التدهور الإيكولوجي في ترسب حمضي شهدته أوروبا الوسطى والغربية وكذلك الجانب الشرقي من أمريكا الشمالية جراء انبعاثات غازي أكسيد الكبريت SO_x وأكسيد النيتروجين NO_x الناتجة عن محطات الطاقة العاملة بالفحم، وكذلك بفعل انبعاثات السيارات، حيث وصلت إلى نطاق شبه قاري، وهو ما أعتُبر على نطاق واسع حتى منتصف ثمانينيات القرن الفائت المشكلة البيئية الملحة أمام البلدان التي تنعم بالرخاء (سميل 1985، 1997). واتخذت مجموعة من الإجراءات - منها التحول إلى فحم منخفض الكبريت واستعمال الغاز الطبيعي الخالي من الكبريت في توليد الكهرباء، واستخدام محركات سيارات تعمل على البنزين والديزل النظيف وتستخدم فيها محركات أكثر كفاءة، وتركيب أجهزة لنزع الكبريت من الغازات المتدفقة في مصادر التلوث الرئيسة، حيث لم تعمل هذه الإجراءات على ضبط عملية الأكسدة فحسب، بل عكست اتجاهها عام 1990، ما خفض الهطولات الحمضية في كل من أوروبا وأمريكا الشمالية (سميل 1997).

كان التدمير الجزئي لطبقة الأوزون فوق القطب الجنوبي والمحيط من حولها محور المخاوف البيئية المرتبطة باستخدام الطاقة. وقد تنبأ العلماء بدقة بإمكانية تراجع تركيز طبقة الستراتوسفير الحامية لكوكبنا من الأشعة فوق البنفسجية الزائدة عام 1974، وقيست هذه الظاهرة أول مرة فوق القطب الجنوبي عام 1985 (رولاند 1989). ونجم فقدان الأوزون بشكل كبير عن إطلاق

غازات كلوروفلوروكربون (CFCs المستخدمة بمعظمها في أجهزة التبريد)، إلا أن المعاهدة الدولية الفعالة التي وقعت عام 1987 باسم بروتوكول مونتريال، والتحول إلى مركبات أقل ضرراً خفف من القلق بشكل سريع (أندرسن Andersen وسارما Sarma أ2002).

كان التهديد المحيط بأوزون الستراتوسفير مجرد التهديد الأول لعديد من المخاوف الجديدة حيال التبعات العالمية للتغيرات البيئية (ترنر وآخرون 1990؛ مكنيل 2001؛ فريدمان 2014). وتراوحت المخاوف البارزة من فقدان التنوع الحيوي العالمي إلى تراكم البلاستيك في المحيطات، إلا أن أحد المخاوف البيئية العالمية احتل الصدارة في أواخر ثمانينيات القرن الفائت، ألا وهي انبعاثات غازات الدفيئة الناجمة عن البشر والتي تحدث تغيرات مناخية سريعة، وعلى رأسها الارتفاع الحروري في طبقة التروبوسفير، وتحمض المحيطات، وارتفاع منسوب البحار. حظي سلوك غازات الدفيئة وتأثيرها المحتمل في ارتفاع درجة الحرارة بفهم جيد نوعاً ما في نهاية القرن التاسع عشر (سميل 1997). فقد كان المساهم الرئيس في هذه الانبعاثات والناجم عن النشاط البشري هو غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) - ذلك الناتج النهائي عن احتراق أنواع الوقود الأحفوري كافة والكتلة الحيوية - وتدمير الغابات (وعلى رأسها غابات المناطق المدارية الرطبة)، فضلاً عن المراعي التي كانت المصدر الثاني الأكثر أهمية لانبعاثات CO_2 (اللجنة المشتركة بين الحكومات المعنية بالتغير المناخي 2015).

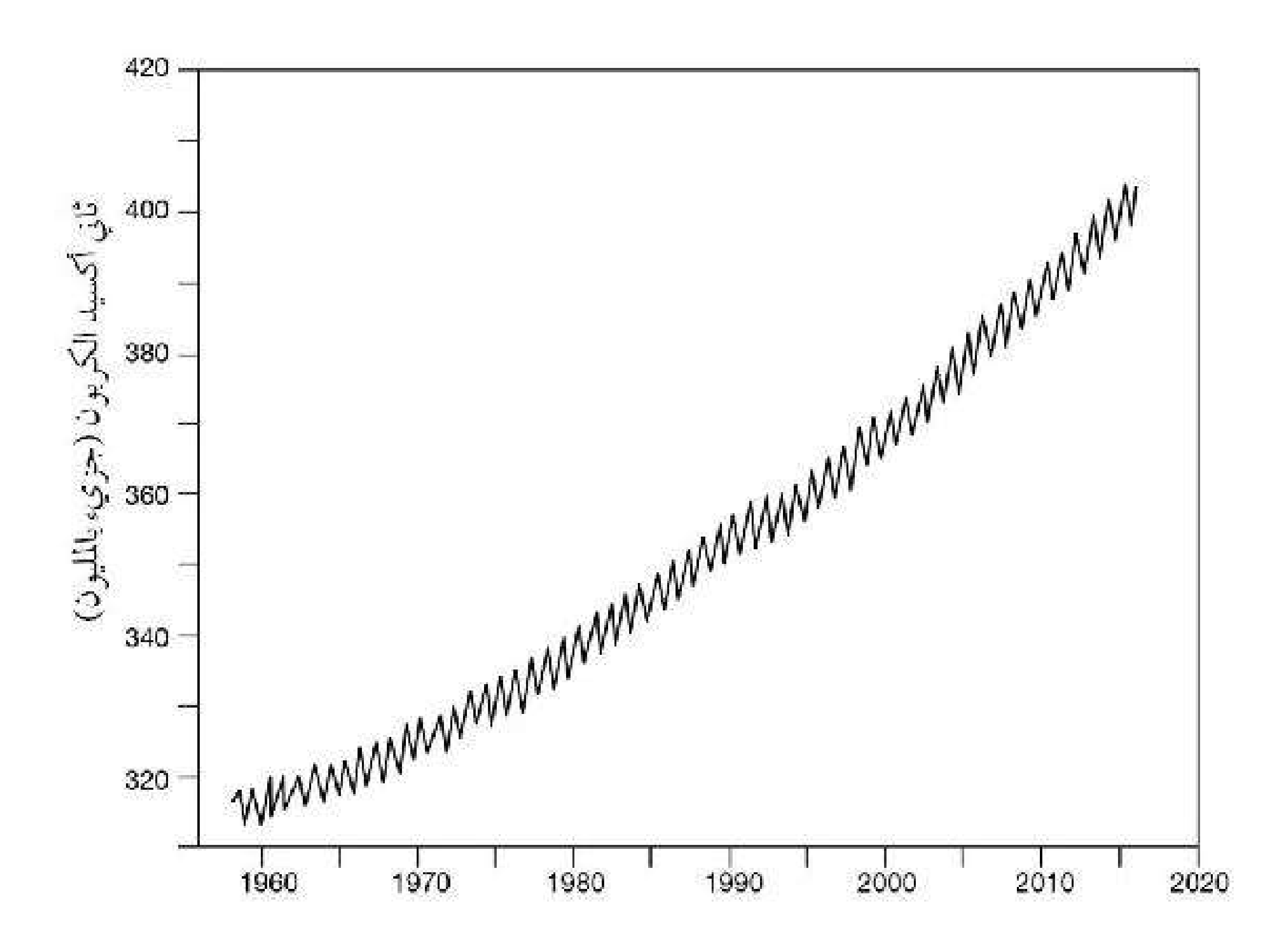
منذ عام 1850، حين كان الكربون لا يتعدى 54 ميغا طن (مضروباً بـ 3.667 لتحويله إلى ثاني أكسيد الكربون)، والعالم يشهد زيادة أسية في توليد ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم والناتج عن النشاط البشري وذلك مع زيادة استهلاك الوقود الأحفوري. فكما أشرنا آنفا، ارتفع بحلول عام 1900 إلى 534 ميغا طن كربون، لتتجاوز كميته 9 جيغا طن عام 2010 (بودن Boden وأندريه Andres أ2015). وفي عام 1957، خلص هانز سويس Hans Suess وروجر ريفيل Roger Revelle إلى أن:

> الإنسان يجري اليوم تجربة جيوفيزيائية واسعة النطاق، تجربة لم يكن من الممكن أن تنفذ في الماضي ولا يمكن تكرارها مستقبلاً؛ إذ نقوم خلال بضعة قرون بإعادة الكربون العضوي المركز والمخزن في الصخور الرسوبية على مدى مئات ملايين السنين إلى الغلاف الجوي والمحيطات. (ريفيل وسويس 1957، 19).

بدأت أول عمليات قياس منتظم لارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون نظمها تشارلز كيلنج Charles Keeling أ(1928-2005) عام 1958 بالقرب من قمة جبل ماونا لاو في هاواي، وكذلك في القطب الجنوبي (كيلنج 1998). فقد استخدمت قياسات التركيز في ماونا لاو كمؤشر عالمي على ارتفاع ثاني أكسيد الكربون CO_2 في طبقة التروبوسفير: إذ تراوح معدل تركيزه بين 316 جزء في المليون عام 1959 وأكثر من 350 جزء في الميون عام 1988، و398.55 جزء في المليون عام 2014 (الإدارة الوطنية لشؤون المحيطات والغلاف الجوي 2015؛ الشكل

22-6). وهنالك غازات دفيئة أخرى تنبعث عن أنشطة بشرية نسبتها أقل من نسبة ثاني أكسيد الكربون، لكن نظراً لأن جزيئاتها تمتص كماً أكبر نسبياً من الأشعة تحت الحمراء الصادرة (الميثان 86 ضعفاً على مدى 20 عاماً، أكسيد النترات 268 ضعفاً قياساً بغاز ثاني أكسيد الكربون) فإن إسهامها مجتمعة يشكل نحو 35% من الضغط الإشعاعي الناجم عن النشاط البشري (المربع 6-18).

ثمة إجماع على وجوب بقاء معدل ارتفاع درجات الحرارة أقل من 2 ^{o} مئوية لتجنب أسوأ التبعات الناجمة عن احترار الأرض، غير أن هذا يتطلب كبحاً مباشراً وكبيراً لاحتراق الوقود الأحفوري وتحولاً سريعاً إلى مصادر طاقة غير كربونية - هو ليس بالتطور المستحيل، لكنه ضئيل الاحتمال نظراً لسيطرة الوقود الأحفوري على نظام الطاقة العالمية واحتياجات مجتمعات الدخل المنخفض إلى الطاقة بشكل هائل: إذ يمكن أن تغطى بعض هذه الاحتياجات الجديدة الكبيرة من توليد الكهرباء اعتماداً على الطاقة المتجددة، إلا أنه لا يوجد بديل ميسور التكاليف بكميات كبيرة عن الوقود المخصص للنقل أو الأعلاف السيلولوزية (الأمونيا والبلاستيك) أو لصهر فلزات الحديد.



الشكل 6-22

قياس غاز ثاني أكسيد الكربون الجوي في مرصد ماونا لاو في هاواي (الإدارة الوطنية لشؤون المحيطات والغلاف الجوي 2015).

المربع 6-18

غازات الدفيئة وارتفاع حرارة الغلاف الجوي

في عام 2014، وصلت النسبة العالمية للضغط الإشعاعي الناجم عن النشاط البشري (إمكانية تأثير غازات الدفيئة في توازن الطاقة للكوكب) إلى 2.936 واط/م^2، حيث أسهم غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة 65% منها (بتلر Butler ومونتزكا Montzka أ2015). وعلى مستوى المصادر، شكل الوقود الأحفوري ما يزيد على 60%، في حين شكلت تغيرات استخدام الأراضي (لاسيما التصحر) 10%، وانبعاثات الميثان (وبخاصة من المواشي) نحو 20%. ويظهر معدل ارتفاع درجات الحرارة عالمياً (بيانات مشتركة من المحيط واليابسة) ارتفاعاً خطياً يبلغ 0.85 درجة مئوية (0.65-1.06 درجة مئوية) بين عامي 1880 و2012 (اللجنة المشتركة بين الحكومات المعنية بالتغير المناخي 2015). ولعل الضبابية التي تحيط بمستوى الانبعاثات العالمية مستقبلاً وتعقيد العمليات الجوية والمائية الجوية المتعلقة بالمحيط الحيوي، وحالات التآثر التي تحكم دورة الكربون العالمية تجعل إنشاء نماذج موثوقة للتنبؤ بارتفاع درجات الحرارة ومنسوب البحار لعام 2100 ضرباً من المستحيل. ويظهر أحدث تقييم نفذ بالإجماع أن معدل درجة الحرارة العالمية (اعتماداً على معدلات الانبعاثات المستقبلية) سترتفع في نهاية القرن الحادي والعشرين (2081-2100) بما لا يقل عن 0.3-1.7 درجة مئوية قياساً بالفترة 1986-2005، إلا أن هذا المعدل قد يصل بارتفاعه إلى 2.6-4.8 درجة مئوية (اللجنة المشتركة بين الحكومات المعنية بالتغير المناخي 2015).

على أي حال، ستواصل درجة الحرارة في منطقة القطب الشمالي ارتفاعها بوتيرة أسرع. ومن الواضح أن النسب الأدنى تسهل من مسألة التكيف، في حين أن القيم الأعلى للزيادات المحتملة ستحمل معها كثيراً من المشكلات الخطيرة. ويتراوح مجال التغيرات العديدة المنسوبة إلى ارتفاع حرارة الأرض من ظهور أنماط هطولات جديدة، وفيضانات في المناطق الساحلية، وتحولات في حدود النظام البيئي، إلى انتشار المناخ الدافئ والأمراض السارية مع ناقلات الأمراض. وستكون التغيرات التي تشهدها الإنتاجية العالمية وخسارة العقارات القريبة من الشواطئ، والبطالة في شتى القطاعات، والهجرة بأعداد كبيرة من المناطق المتضررة بمثابة تبعات اقتصادية رئيسة. كما لا يوجد حل تقني سهل (كحجز ثاني أكسيد الكربون عن الهواء أو تخزينه تحت الأرض، إذ على كلتا الطريقتين التعامل، وبتكلفة ميسورة، مع أكثر من 10 جيغا طن من CO_2/سنة كي تكون

فعالة) لانبعاثات غاز الدفيئة الناجمة عن النشاط البشري. أما النهج الناجح المحتمل والوحيد فيبقى في التعامل مع مثل هذه التغيرات من خلال تعاون دولي غير مسبوق. لا شك في أن هذا التحدي المقلق يولد، عن غير قصد، دافعاً أساساً نحو انطلاقة جديدة لإدارة الشؤون البشرية.

الفصل السابع
الطاقة على مر التاريخ

ما كل العمليات الطبيعية والأنشطة البشرية في جوهرها المادي الأصيل إلا أشكالاً من تحولات الطاقة. فتقدم الحضارات يمكن أن يرى بصفته سعياً لاستخدام قدر أكبر من الطاقة المطلوبة لحصاد كميات أكبر من المحاصيل الغذائية، وحشد المزيد من المخرجات والمواد المتنوعة لزيادة إنتاج السلع المتنوعة بما يمكن من إجراء توسيع نطاق التنقلات، مع فتح المجال أمام كم غير محدود من المعلومات. ومن نتائج تلك الإنجازات ارتفاع عدد السكان المنظَّمين وفق تعقيد اجتماعي أعظم إلى دول وجماعات تتخطى الحدود القومية وتتمتع بحياة مرفهة. أما من حيث توضيح المعالم البارزة لهذا التاريخ من حيث مصادر الطاقة السائدة ووسائط التحريك الأولية الرائدة فآمل أن يطرح في هذا الكتاب بأسلوب مباشر إلى حدّ ما. في حين يبقى التحقق من أهم التبعات الاجتماعية والاقتصادية لتلك التغيرات التقنية مسألة لا صعوبة فيها.

أما الجانب الذي يمثل مستوى أكبر من التحديات فيكمن في إيجاد توازن معقول بين رؤية التاريخ من خلال مؤشر ضرورات الطاقة وإيلاء اهتمام مناسب لعوامل عدة لا علاقة لها بالطاقة أدت إلى إطلاق استخدام الإنسان لها والتحكم بذلك الاستخدام وتشكليه وكانت سبباً في تحولاته. ولو سبرنا أغوار الأسس بعمق لوجدنا أن من الضروري أيضاً ملاحظة التناقض الكبير لدور الطاقة في تطور الحياة بصفة عامة، وفي تاريخ البشرية بصفة خاصة. فجميع النظم الحية تلقى الدعم من خلال إمدادات الطاقة المتواصلة، حيث يؤدي هذا الاعتماد بالضرورة إلى إدخال عدد من المتناقضات الرئيسة. إلا أن تدفقات الطاقة الداعمة للحياة هذه تعجز عن شرح وجود الكائنات نفسها أو التعقيدات الخاصة لتنظيمها.

الأنماط الكبرى لاستعمال الطاقة

تتكشف العلاقة طويلة الأجل بين الإنجازات البشرية ومصادر الطاقة السائدة ووسائط التحريك الأولية المتغيرة بأوضح أشكالها حين ننظر إليها من زاوية عصور الطاقة وتحولاتها. ولا بد أن يتحاشى هذا النهج التحديد الدقيق للفترات الزمنية (نظراً لبطء ظهور بعض التحولات). كما يجب أن ندرك بأن التعميم المتعلق بفترات محددة يجب أن يأخذ بعين الاعتبار الاختلافات الموجودة عند بداية التحولات ووتيرة العمليات الأساسية، إذ إن التطورات السريعة الاستثنائية التي شهدتها الصين ما بعد عام 1990 تعد من أفضل الأمثلة مؤخراً، حيث استطاعت في جيل واحد أن تنجز ما استلزم غيرها من الأمم ثلاثة أجيال لإنجازه في باكورة مراحل التحول الصناعي. أضف إلى

ذلك وجود الكثير من الخصوصيات الوطنية والإقليمية التي عملت على توجيه تلك التغيرات المعقدة وتشكيلها.

وتبدو لنا حالات الاتساق التي أظهرتها عصور بعينها من الطاقة بأوضح صورها في الأنشطة المتعلقة باستخراج أنواع الطاقة وتحويلها وتوزيعها. فعضلات الإنسان والثيران المسخرة للجرّ تضع مساحة الأرض التي يمكن زراعتها أو حصادها في اليوم الواحد ضمن حدود متماثلة، سواء أكانت تلك الأرض في البنجاب أم في بيكاردي؛ وكذلك كان الفرق بين إنتاج الفحم النباتي من أكوام تقليدية في توهوكو (شمالي جزيرة هونشو) طفيفاً بالمقارنة مع إنتاجه في يوركشير (شمال إنجلترا). إذ باتت هذه النقاط المشتركة في الحضارة العالمية الحديثة بمثابة هويات مطلقة: فمصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية أمست تستخدم وتستخرج وتحول في جميع أرجاء العالم باستخدام ذات العمليات والآليات التي ينتجها أو يوزعها غالباً عدد ضئيل من الشركات العالمية المهيمنة على السوق.

من أمثلة تلك الشركات العالمية شلمبيرغر Schlumberger، وهاليبيرتون Halliburton وسايبم Saipem ورانزوسين ransocean وبيكر Baker في ميدان خدمات حقول النفط؛ وكاتربيلار Caterpillar وكوماتسو Komatsu وفولفو Volvo وهيتاشي Hitachi وليبهر Liebherr في آليات الإنشاءات الثقيلة. أما جنرال إلكتريك General Electric وسيمنز Siemens وألستون Alstom وفير ألن Weir Allen وإليوت Elliott فاختصت في إنتاج العنفات البخارية الضخمة؛ في حين أنتجت بوينغ وإيرباص الطائرات النفاثة الضخمة. ومع إمكانية وصول تلك الخدمات والمنتجات التي توافرها تلك الشركات تقلصت الفروقات الدولية التي كانت موجودة آنفاً على مستوى الأداء والموثوقية بشكل كبير أو اختفت كلياً، وفي بعض الحالات بات لدى الأطراف التي بدأت متأخرة نسب أكبر من التقنيات المتطورة قياساً بما كان لدى رواد التحول الصناعي. ورغم الاختلافات الهائلة في المحيط الثقافي والسياسي يبقى ثمة نطاق تعميم واسع ومدهش حيال التبعات الاجتماعية والاقتصادية لتلك التغيرات الرئيسة المتعلقة بالطاقة.

نظراً لأن جل الاستثمارات المثمرة في مصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية المتطابقة يتطلب التقنيات عينها، نرى أن هذا التجانس ينطوي على الكثير من التأثيرات المتطابقة أو المتشابهة إلى حد كبير لا تقتصر على زراعة المحصول (الذي يؤدي إلى هيمنة بضعة محاصيل تجارية وإنتاج أغذية حيوانية بكميات كبيرة)، والأنشطة الصناعية (التي تشتمل على التخصص والتركيز والأتمتة)، وتنظيم المدن (الذي يؤدي إلى انتعاش أحياء الأعمال في مركز المدينة، والتحضر وبالتالي الرغبة في إيجاد مساحات خضراء) وترتيبات النقل (التي تظهر في المدن الكبرى كالحاجة إلى قطارات الأنفاق وقطارات الضواحي والتنقل بالسيارة وأساطيل سيارات الأجرة) فحسب، بل تشمل أيضاً أنماط الاستهلاك والترفيه عن النفس، والطموحات غير الملموسة.

وفي كل مجتمع ناضج يستهلك كثيراً من الطاقة، وفي المناطق الحضرية لكثير من الاقتصادات التي لا تزال تشهد نمواً سريعاً نسبياً، يقتني أجهزة التلفاز والثلاجات والغسالات ما يربو على 90% من الأسر، أما المواد الأخرى التي تمتلك بمعدلات مرتفعة فتتراوح بين الأجهزة الإلكترونية الشخصية وأجهزة تكييف الهواء والسيارات الخاصة بالركاب. وعلى المستوى

العالمي، تشمل اتجاهات استهلاك الغذاء تدويل المذاقات (فوجبة تيكا ماسالا tikka masala هي الوجبة الغذائية الأكثر شيوعاً في إنجلترا، وكذلك كاري رايسو kare raisu في اليابان)، وانتشار الأغذية السريعة مع توافر الفاكهة والخضراوات الموسمية على مدار العام، وهي رفاهية تُشترى بتكلفة طاقة كبيرة جراء الشحن عبر القارات داخل حاويات مبردة وتوصيلها جواً. ومن بين أنشطة أوقات الفراغ عالمياً اليوم نجد رحلات جوية إلى شواطئ دافئة، وزيارات إلى مدن الملاهي (فديزني لاند الأمريكية باتت اليوم في فرنسا والصين وهونج كونج واليابان)، وكذلك السفر على متن سفن الجولات البحرية (التي كانت سابقاً هواية أوروبية وأمريكية لقضاء العطلات، باتت سريعة النمو في آسيا). ولو مضينا أبعد من ذلك لوجدنا أن أسس الطاقة التي يتم اقتسامها تحمل تأثيراً في نهاية المطاف في كثير من الطموحات غير الملموسة، وعلى رأسها التعليم المتقدم (وتعليم النخبة).

يتكرر ظهور الفجوة بين مجتمعات الدخل المنخفض (التي تعتمد في استهلاكها للطاقة على خليط من وقود الكتلة الحيوية التقليدي ووسائط التحريك الأولية الحية، ونسبة متزايدة من الوقود الأحفوري والكهرباء) وبلدان الطاقة المرتفعة (الصناعية وما بعد الصناعية) التي وصل استهلاك الفرد فيها من الوقود الأحفوري والكهرباء إلى مستويات الإشباع أو اقترب منها. ويمكن لمس هذه الفجوة في المستويات كافة، إذ يمكن مشاهدتها في إجمالي الناتج الاقتصادي أو معدل المستوى المعيشي، وكذلك في إنتاجيات العمال أو تلقي التعليم. وهذه الفجوة تبقى أقل من مسألة فروقات بين الدول، وأوسع عندما يتعلق الأمر بالامتياز (إمكانية الوصول والتعليم والفرص)، حيث تتضح هذه الحقيقة في طبقة الأثرياء في الصين والهند. ففي عام 2013 طلب أحد فروع نادي السيارات الرياضية في الصين من أعضائه اقتناء سيارة أفضل من بورشة كاريرا GT التي يبلغ سعرها 440.000 دولار (تايلور Taylor أ2013)، بينما نجد ناطحة السحاب موكيش أمباني Mukesh Ambani أغلى الأبنية السكنية الخاصة في آسيا والمؤلفة من 27 طابقاً بتكلفة ملياري دولار في وسط مدينة مومباي تطل مباشرة على العشوائيات الآخذة في التوسع.

عصور الطاقة ومراحلها الانتقالية

ينبغي على أي عملية تحديد واقعي لفترات استخدام الطاقة البشرية أن تأخذ بعين الاعتبار أنواع الوقود الأحفوري ووسائط التحريك الأولية الرائدة على حدّ سواء. هذه الحاجة تستبعد تقسيم المفاهيم الجذابة للتاريخ إلى مجرد عصرين متميزين للطاقة. فالطاقة الحية مقابل الطاقة غير الحية (الميكانيكية) تبين المفارقة بين المجتمعات التقليدية التي كانت فيها العضلات البشرية والحيوانية وسائط التحريك الأولية المهيمنة، والحضارة الحديثة التي تعتمد على آلات تعمل بالوقود والكهرباء. إلا أن هذا التقسيم مضلل سواء في الماضي أو الحاضر. ففي عدد من الثقافات العالية القديمة، أحدثت فئتان من وسائط التحريك الأولية الميكانيكية - النواعير وطواحين الهواء - فروقات جوهرية قبل قرون من وصول الآلات الحديثة.

يرجع نهوض الغرب بدرجة كبيرة إلى مزيج قوي لمحركين ميكانيكيين أساسين: تسخير فعال لطاقة الرياح واعتماد البارود، وهما أمران تجسدا في السفن الشراعية العابرة للمحيطات والمجهزة بمدافع ثقيلة (مكنيل McNeill أ1989). أما الفصل بين وسائط التحريك الأولية الحية والميكانيكية فلم يكتمل إلا لدى الخمس الغني من بني البشر. فالاعتماد الراسخ على العمالة البشرية والحيوانية بدرجة كبيرة لا يزال هو العرف السائد في أفقر المناطق الريفية في أفريقيا وآسيا، حيث ينفذ يومياً مئات ملايين العمال مهمات يدوية منهكة (وخطيرة في الغالب) في كثير من صناعات الاستخراج والمعالجة والتصنيع في البلدان منخفضة الدخل (أعمال تتراوح من سحق الحجارة إلى الرصف بالحصى إلى تفكيك ناقلات النفط القديمة).

أما التبسيط الثاني، وهو استخدام مصادر الطاقة المتجددة مقابل مصادر الطاقة غير المتجددة فيعالج الانفصام بين آلاف السنين من سيطرة وسائط التحريك الأولية الحية ووقود الكتلة الحيوية، وبين الماضي القريب الذي اعتمد بشكل كبير فيها على الوقود الأحفوري والكهرباء. هنا أيضاً كانت التطورات الفعلية أكثر تعقيداً. فالإمداد بالكتلة الحيوية إبان مجتمعات العصر الخشبي لم يكن مسألة قابلية تجديد مضمونة: فالقطع الجائر للأشجار أسفر عن انجراف مدمر للتربة عند المنحدرات سريعة التأثر حيث دمر ظروف النمو المستدام للغابات في مساحات واسعة من العالم القديم، وبخاصة في المناطق المتوسطية وشمال الصين. وفي العالم المحكوم اليوم بالوقود الأحفوري، تولد طاقة المياه، ذلك المورد المتجدد، قرابة سدس إجمالي الطاقة الكهربائية، بينما (كما أشرنا للتو) لا يزال أغلب المزارعين في البلدان الفقيرة يعتمدون على العمالة البشرية والحيوانية في الحقل وصيانة نظم الري.

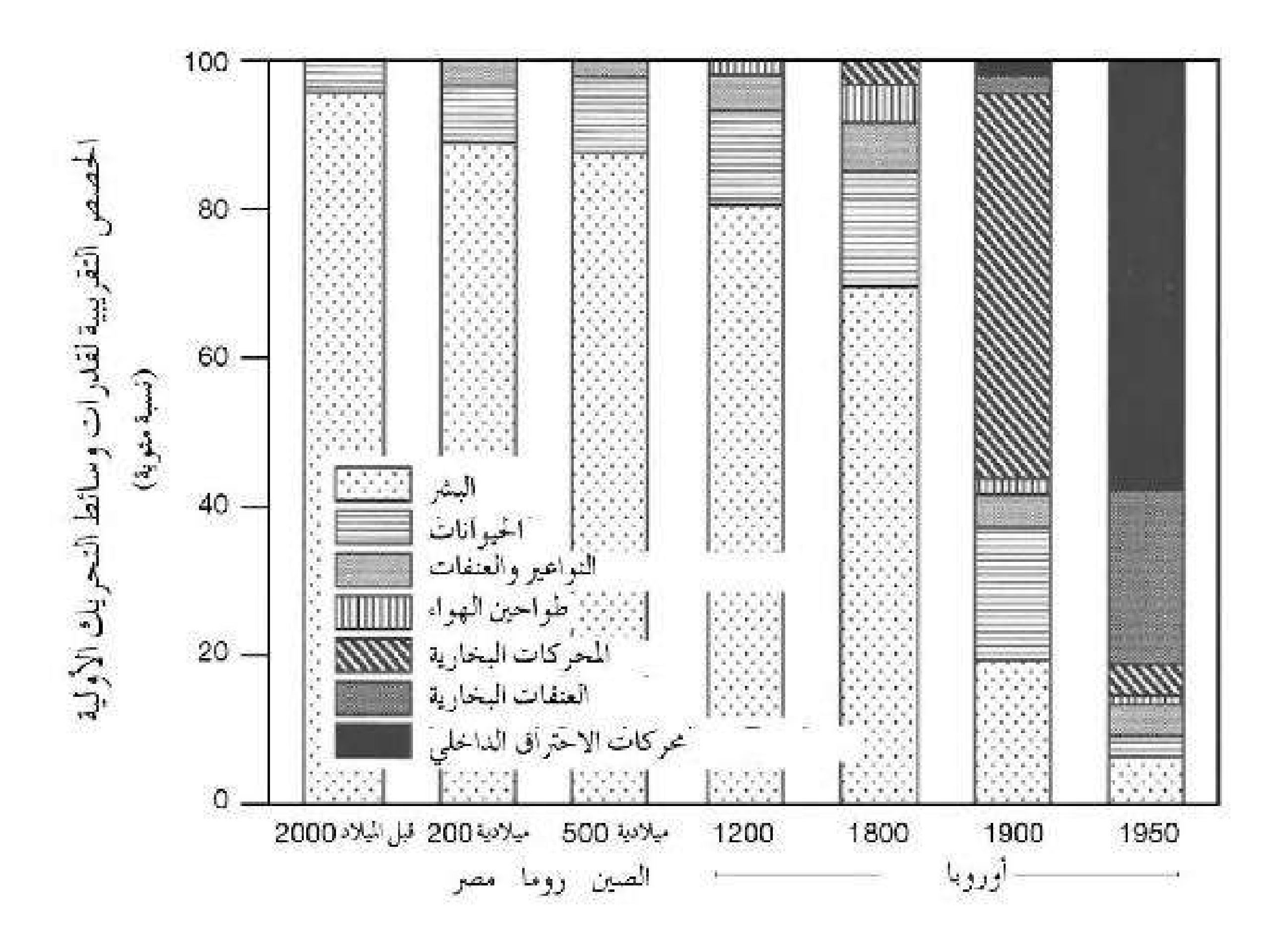
إن تقسيم الطاقة الواضح إلى عصور محددة بعيد عن الواقع لا بسبب الفروقات الجلية على المستويين الوطني والإقليمي عند زمن ابتكار أنواع الوقود الجديدة واعتماد وسائط التحريك الأولية على نطاق واسع فحسب، بل بسبب الطبيعة التطورية لتحولات الطاقة (ميلوسي Melosi أ1982؛ سميل 2010أ) أيضاً. ويمكن لمصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية المتأصلة أن تتسم باستمرارية مدهشة، في حين أن الإمدادات أو التقنيات الجديدة لا تهيمن إلا بعد فترات طويلة من انتشارها تدريجياً. ولعل توليفة الأداء الوظيفي وإمكانية الوصول إليها وتكاليفها هي ما يفسر هذا الخمول. فطالما بقيت المصادر ووسائط التحريك الأولية المتأصلة تعمل جيداً وسط محيط راسخ، وكانت متاحة ومربحة بالأصل، بقيت بدائلها، حتى التي تتسم ببعض الصفات المتفوقة بشكل واضح، تتقدم تقدماً بطيئاً وحسب. وقد يرى خبراء الاقتصاد هذه الحقائق أمثلة عن الانغلاق أو الاعتماد على مسار محدد، تماماً مثل مفهوم دايفيد (1985) الذي بنى جدله على هيمنة ترتيب الحروف على لوح المفاتيح QWERTY (مقابل أنموذج دفورجاك Dvorak المفترض أنه متفوق).

لكننا لسنا بحاجة إلى أي واسمات جديدة مشكوك بها لوصف ماهية عملية التطور الثوري البطيء الشائعة والملحوظة في تطور المخلوقات وصناعة القرار الشخصي، والمتضحة كذلك في التطورات التقنية والإدارة الاقتصادية. والأمثلة من تاريخ الطاقة كثيرة في هذا الشأن. فالطواحين المائية الرومانية كانت قد استخدمت أول مرة في القرن الأول قبل الميلاد، إلا أنها لم تنتشر فعلياً

إلا بعد 500 عام. وحتى تلك الفترة، كان استخدامها مقتصراً بشكل شبه كلي على طحن الحبوب. ووفقاً لما أشار إليه فينلي Finley أ(1965) فإن تحرير العبيد والحيوانات من بؤسها لم يكن حافزاً قوياً لإدخال الطواحين المائية على جناح السرعة. ومع نهاية القرن السادس عشر أمست الملاحة حول الأرض على متن السفن الشراعية شائعة إلى حدّ ما - لكن في عام 1571 استخدم كل طرف في معركة ليبانتو Lepanto أكثر من 200 سفينة، وفي عام 1588 كان لدى الأسطول الإسباني المجهز لغزو إنجلترا أربع سفن ضخمة وأربع سفن حربية طرادة على متنها ما يزيد على 2.000 من المجدفين المُدانين، فضلاً عن السفن السويدية المدججة بالمدافع والتي استخدمت لتدمير معظم سفن الأسطول الروسي في سفينسكسوند Svensksund عام 1790 (مارتن وباركر 1988؛ باركر 1996).

تعايشت حيوانات الجر والطاقة المائية والمحركات البخارية جنباً إلى جنب في أوروبا وأمريكا الشمالية في أثناء فترة التحول الصناعي ولأكثر من قرن من الزمن. ففي الولايات المتحدة الغنية بالأخشاب، تفوق حرق الفحم على الحطب، وصار فحم الكوك أهم من الفحم النباتي، وذلك في ثمانينيات القرن التاسع عشر فقط (سميل 2010أ). أما اعتماد الطاقة الميكانيكية المستخدمة في الزراعة على طاقة الخيل والبغال فتوقف في أواخر عشرينيات القرن المنصرم، إلا أن ملايين البغال بقيت موجودة في جنوب الولايات المتحدة في مطلع خمسينيات القرن الفائت، ولم تتوقف وزارة الزراعة الأمريكية عن إحصاء الحيوانات العاملة إلا في عام 1963. وفي الحرب العالمية الثانية، لم تكن السفن من فئة «ليبرتي Liberty» أ(EC2) المنتجة بالجملة، وهي سفن الشحن الرئيسة في الولايات المتحدة، مزودة بمحركات ديزل جديدة عالية الكفاءة، بل عملت بالمحركات البخارية ثلاثية الأسطوانات ذات قدرة مُثبتة ولها مراجل تعتمد في عملها على حرق الزيت (إلفيك Elphick أ2001).

ولا تكون التقريبات الإيحائية ممكنة إلا عند رسم مخطط لأنماط انتشار وسائط التحريك الأولية على المدى الطويل داخل مجتمعات العالم القديم الذي سبق العصر الصناعي. أما أبرز ملامحها فكان في هيمنة العمالة البشرية (الشكل 7-1) إذ كانت عضلات الإنسان هي المصدر الوحيد للطاقة الميكانيكية منذ بداية تطور البشر وحتى عمليات تدجين حيوانات الجر التي لم تبدأ إلا قبل نحو 10.000 عام. وازدادت الطاقة البشرية من خلال تزايد استخدام معدات أفضل، بينما بقي عمل الحيوانات في العالم القديم محدوداً لآلاف السنين من خلال ضعف تكدين حيوانات الجر وعدم كفاية الأعلاف المقدمة لها، مع غياب حيوانات الجر في الأمريكتين وأوقيانوسيا. ما أبقى على العضلات البشرية كوسائط تحريك أساسية لا غنى عنها في المجتمعات كافة ما قبل الصناعية.



الشكل 7-1

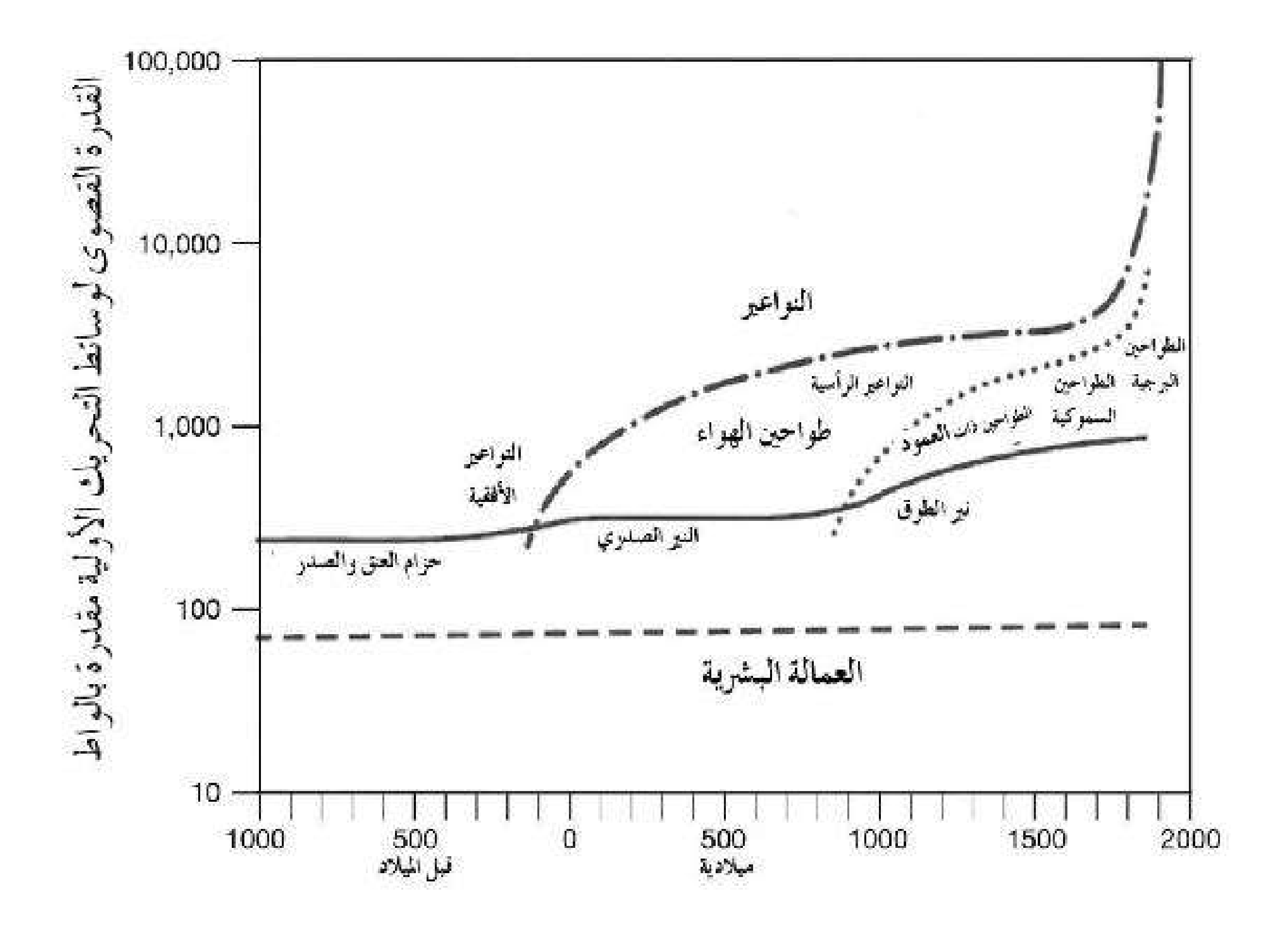
تشكل هيمنة العمالة البشرية لفترة طويلة وبطء انتشار المحركات التي تعمل بقوة المياه والرياح، والاعتماد السريع للمحركات والعنفات ما بعد عام 1800 الملامح الثلاثة التي تبرز في تاريخ وسائط التحريك الأولية. وهنالك نسب تقريبية جرى تقديرها وحسابها اعتماداً على طيف واسع من المصادر المنوه إليها في هذا الكتاب.

ينقسم استخدام العمالة البشرية في الحضارات القديمة كافة إلى قسمين بارزين. فخلافاً لانتشار هذه العمالة على نطاق واسع لتسطير مآثر ملحوظة على مستوى الإنشاءات الثقيلة، لم تتخذ الثقافات العالية، سواء اعتمدت على العبودية، أو على السخرة، أو العمل الحر بنسبة أكبر، أي خطوة لتصنيع السلع على نطاق واسع فعلياً. فقد ظل تشظي عملية الإنتاج هو العرف (كرايست Christ أ1984). بينما سيطر الصينيون إبان حكم أسرة هان على بعض الطرائق المحتملة للإنتاج بكميات

كبيرة. ولعل الجانب الأبرز كان إتقانهم صب الحديد على نحو يناسب صناعة العديد من القطع المعدنية الصغيرة المتطابقة في عملية صب واحدة (هوا Hua أ1983). لكن أكبر قالب اكتشف إبان حكم أسرة هان كان بعرض 3 أمتار وبطول يقل عن 8 أمتار. وخارج أوروبا وأمريكا الشمالية، بقيت الصناعات الحرفية ذات النطاق الضيق نسبياً هي العرف السائد حتى القرن العشرين، ليبقى الافتقار إلى النقل البري الرخيص عاملاً رئيساً واضحاً أعاق الإنتاج بالجملة.

إن تكاليف التوزيع خارج أي دائرة صغيرة نسبياً كانت ستفوق أي اقتصاد من اقتصادات النطاق التي تكتسب بفضل التصنيع المركزي، كما أن كثيراً من مشاريع الإنشاءات لم تتطلب فعلياً مدخلات عمالة أكبر من المألوف إذ كان بمقدور عدد يتراوح بين عدة مئات وبضعة آلاف من عمال السخرة العمل من شهرين إلى خمسة أشهر فقط في السنة لتشييد بنى مرصوصة وضخمة أو جدران دفاعية، وحفر قنوات طويلة للري والنقل، وإنشاء الكثير من السواقي في فترة بين 20-50 سنة فقط. إلا أن الكثير من المشاريع العملاقة بقيت قيد الإنشاء لفترات أطول بكثير. إذ استغرق بناء نظام الري كالاويوا في سيلان نحو 1.400 سنة (ليتش Leach أ1959). وامتدت الأعمال التدريجية لتشييد سور الصين العظيم وإصلاحه لفترة أطول من هذه (والدرون Waldron أ1990). وبالتالي فإن مدة قرن أو اثنين ليست بالطويلة أكثر من المعتاد لاستكمال تشييد إحدى الكاتدرائيات.

لم تبدأ طلائع وسائط التحريك الأولية الميكانيكية بتحقيق فروقات ملحوظة في بعض بقاع أوروبا وآسيا إلا بعد عام 200 ميلادي (طواحين مائية) و900 ميلادي (طواحين هوائية). وقد أدت التطورات التدريجية لتلك الطواحين إلى استبدال الكثير من المهام المرهقة والرتيبة وتسريعها، إلا أن استبدال عمالة الحيوان كان بطيئاً وغير متناسق (الشكل 7-2). وفي كل حالة من الحالات، باستثناء ضخ المياه، تمكنت النواعير وطواحين الهواء من الإسهام قليلاً في تسهيل المهام الحقلية. لهذا تظهر حسابات فوكيت Fouquet أ(2008) التقريبية الخاصة بإنجلترا أن الجهد البشري والحيواني شكل 85% في مجمل الطاقة عام 1500 وحافظ على نسبة 87% عام 1800 (عندما وفرت المياه والرياح نحو 12%) - إلا أنه انخفض إلى 27% فقط بحلول عام



الشكل 7-2

بقي معدل طاقة الوحدة في وسائط التحريك الأولية التقليدية محدوداً حتى بعد اعتماد نواعير أكبر في مطلع العصر الحديث، بينما لم يأت التغيير إلا مع المحركات البخارية في القرن التاسع عشر. أعد مخطط القدرة القصوى اعتماداً على مصادر خاصة بوسائط التحريك الأولية تم التنويه إليها في معرض كتابنا هذا.

1900، حيث طغى استخدام المحرك البخاري في الصناعات آنذاك. لكن حتى في عصر المحرك البخاري، لم يكن بالإمكان التخلي عن العمالة الحية لاستخراج الوقود الحيوي وتوزيعه، وكذلك لأداء مهام التصنيع التي لا حصر لها؛ ناهيك عن توظيفها في الزراعة حيث هيمنت على العمل الحقلي في القرن التاسع عشر (المربع 7-1).

لكن قبل فترة طويلة من زيادة الطاقة العظمى للحيوانات العاملة بنحو ثلاثة أضعاف (بفعل استخدام خيول أقوى مزودة بكفل على رقبتها) كانت النواعير هي وسائط التحريك الأولية الأقوى. أما تطورها لاحقاً فاتسم ببطئه، إذ استغرقت أول زيادة بمقدار عشرة أضعاف في أعلى الاستطاعات نحو 1.000 عام، بينما استغرقت الثانية قرابة 800، ثم جاءت المحركات البخارية في نهاية المطاف في أواخر القرن الثامن عشر لتفوق ذروة طاقة الوحدة في تلك المحركات، إلا أن هيمنتها لم تتوقف إلا مع إدخال محركات الاحتراق الداخلي والعنفات البخارية وانتشارها، حيث دخلت حيز الاستخدام في ثمانينيات القرن التاسع عشر، وسادت في عشرينيات القرن المنصرم، وبقيت محركات الاحتراق الداخلي وسائط التحريك الأولية المتنقلة والثابتة على الترتيب في مطلع القرن الحادي والعشرين.

صحيح أن بعض الفوارق المهمة تظهر بين القارات والأقاليم، إلا أن المستويات النمطية لاستهلاك الوقود والنماذج السائدة لاستخدام وسائط التحريك الأولية في الثقافات العالية للعالم القديم كانت متشابهة إلى حدّ ما. لكن إن كان هناك مجتمع قديم انفرد في تطوراته الملحوظة على مستوى استخدام الوقود وتطور وسائط التحريك الأولية فهو بلا شك مجتمع الصين إبان حكم أسرة هان (207 قبل الميلاد - 220 ميلادية)، إذ إن ابتكاراته اعتمدت في مناطق أخرى لا بعد قرون فحسب، بل بعد أكثر من ألف عام. أما أبرز إسهامات الصينيين إبان حكم أسرة هان فكان استخدام الفحم في صناعة الحديد، والحفر لاستخراج الغاز الطبيعي، وصناعة الفولاذ من الحديد الصب، وكذلك استخدامهم واسع النطاق لمحاريث القرص القلاب المنحني المصنوع من الحديد، وبدء استخدام الكفل المركب على الرقبة

المربع 7-1

استمرارية الطاقة الحيوانية

في القارة الأمريكية، تسببت الخيول والبغال والثيران في إحداث تحولات طالت معظم الأراضي المزروعة في يومنا هذا إثر حراثة المراعي الطبيعية الواسعة في السهول العظمى الأمريكية والبراري الكندية والحقول البرازيلية والسهوب الأرجنتينية في العقود الأخيرة من القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين. إلا أن وزارة الزراعة الأمريكية لم تتوقف عن إحصاء حيوانات الجر إلا بحلول عام 1963 مع إدخال طاقة الجرار في أمريكا التي بلغت نحو 12 ضعف استطاعة حيوان الجر القياسية لعام 1920. وفي أواخر عهد الأسر الحاكمة ومطلع العهد الجمهوري في الصين، بقي إسهام طواحين الهواء وطواحين الماء وطاقة البخار إسهاماً هامشياً بالقياس مع عمالة البشر، التي فاق مجموع طاقتها الناتجة طاقة حيوانات الجر. وبحلول عام 1970 بلغ إسهام العمالة البشرية في الصين نحو 200 بيتا جول من الطاقة المفيدة على أفضل تقدير، قياساً بأكثر من 90 بيتا جول وفرتها حيوانات الجر في البلد (سميل 1976).

وأدت هيمنة العضلات البشرية إلى تقليص استطاعة وحدات العمالة الوحيدة الأكثر انتشاراً إلى 6-100 واط من العمل المفيد المتواصل (طوال اليوم). ما يعني أنه في الظروف كافة، وفي بعض الظروف الاستثنائية، لم يصل تركيز الطاقة الأعلى للعمالة البشرية الخاضعة لأمر واحد (مئات إلى آلاف العمال في مواقع الإنشاءات) إلى أكثر من 10.000 - 100.000 واط خلال الجهد المتواصل، بغض النظر عن بعض فترات الذروة القصيرة التي تضاعفت فيها تلك النسب. وعليه، لم يتجاوز التحكم بتدفقات الطاقة من جانب مهندس معماري أول أو عامل إنشاء القنوات تلك التي يعطيها محرك واحد يغذي بالطاقة آليات صغيرة تعمل فوق التربة اليوم.

واستخدام البذارة متعددة الأنابيب، حيث لم تظهر مجموعة مماثلة لتلك التطورات الأساسية لأكثر من ألف عام.

جاء الإسلام في بداياته بتصاميم مبتكرة لآلات رفع المياه وطواحين الهواء، كما أفادت التجارة البحرية لدولة الخلافة الإسلامية من استخدام الأشرعة المثلثة بصورة فعالة. إلا أن العالم الإسلامي لم يدخل أي ابتكارات جذرية على استخدام الوقود أو التعدين أو تسخير الحيوانات. فأوروبا إبان العصور الوسطى، التي اقتبست بشكل انتقائي من الإنجازات الصينية والهندية والإسلامية، هي التي بدأت مسيرة الابتكار في عدد من الطرائق الجوهرية. ولعل ما يفصل حقاً المجتمعات الأوروبية في العصور الوسطى من حيث استخدام الطاقة كان ارتفاع مستوى اعتمادها على الطاقات الحركية للمياه والرياح، إذ سُخر تدفق هذين المصدرين في آلات تزداد تعقيداً، حيث وفرت تركيز الطاقة بدرجات غير مسبوقة لعدد كبير من التطبيقات. وإبان إنشاء أولى الكاتدرائيات الكاثوليكية العظيمة وصلت استطاعة أضخم النواعير إلى قرابة 5 كيلو واط، أي ما يعادل استطاعة أكثر من ستين رجلاً. وقبل بزوغ فجر عصر النهضة بوقت طويل كانت بعض المناطق الأوروبية تعتمد بشكل رئيس على طاقتي المياه والرياح لطحن الحبوب في بادئ الأمر، ومن ثم لتنظيف الملابس وتعدين الحديد؛ كما أسهم هذا الاعتماد أيضاً في شحذ الكثير من المهارات الميكانيكية وانتشارها.

وعليه، كانت أوروبا في أواخر العصور الوسطى ومطلع العصر الحديث موئلاً لتوسع الابتكارات، لكن وفقاً لتقارير الرحالة الأوروبيين المعاصرين الذين أبدوا إعجابهم بغنى «إمبراطورية السماء»، كانت براعة التقنية بصفة عامة في الصين المعاصرة مبهرة بالتأكيد. إلا أن هؤلاء الرحالة لم يدركوا مدى قرب الحركة العكسية. إذ مع نهاية القرن الخامس عشر كانت أوروبا على طريق تسريع ابتكاراتها وتوسيع رقعة انتشارها، بينما كانت الحضارة الصينية التي تنعم بالرخاء على شفا تراجع تقني واجتماعي استمر طويلاً وحمل تأثيرات عميقة. أما التفوق التقني الغربي فلم يستغرق وقتاً طويلاً لإحداث تحولات طالت المجتمعات الأوروبية وتوسيع نطاق انتشار تلك التحولات إلى قارات أخرى.

في عام 1700 كانت مستويات الاستخدام الأنموذجي للطاقة في الصين وأوروبا متشابهة إلى حد كبير، ما خلق بالتالي تشابهاً في متوسط الرخاء المادي. وفي منتصف القرن الثامن عشر كان الدخل الحقيقي لعمال البناء في الصين مماثلاً لنظرائهم في بقاع أوروبية أقل تطوراً، إلا أنه تخلف عن الاقتصادات الرائدة في القارة (آلن Allen وآخرون 2011). لكن التطورات الغربية تسارعت في أعقاب تلك الفترة لتترجم في عصر الطاقة على صورة مزيج من زيادة المحاصيل وتعدين الحديد اعتماداً على الكوك كطريقة جديدة، وتحسن مستوى الملاحة، وظهور تصاميم جديدة للأسلحة، والرغبة في التجارة ومتابعة التجارب. يقول بوميرانز Pomeranz أ(2002) إن ارتباط إقلاع تلك التطورات بالمؤسسات أو بالمواقف أو بالتركيبة السكانية في بؤرة المناطق الاقتصادية في أوروبا والصين يبقى أقل من ارتباطه بموقع الفحم الذي وجد صدفة في تلك المناطق وأقل كذلك من ارتباطه بالعلاقات المختلفة تماماً بين تلك البؤر والمناطق المحيطة بها، وكذلك بعملية الابتكار عينها.

وجد آخرون أن جذور هذا النجاح ترجع إلى العصور الوسطى. فالتأثير المؤاتي للمسيحية في التطورات التقنية بصفة عامة (بما في ذلك المفهوم الجوهري لكرامة العمل اليدوي) والسعي للرهبنة في العصور الوسطى للتوصل إلى الاكتفاء الذاتي بصفة خاصة كانت مكونات مهمة لهذه العملية (وايت White أ1978؛ باسالا Basalla أ1988). حتى أوفيت الذي يشكك بأهمية تلك الروابط يعترف بأن تقليد الرهبنة في التمسك بأصول الكرامة والفائدة الروحية الذي يوفره العمل كان عاملاً إيجابياً. على أي حال، كانت جل البقاع المتطورة اقتصادياً في الصين وأوروبا عام 1850 تنتمي إلى عالمين مختلفين، تباعداً بحلول عام 1900 بفعل فجوة أداء واسعة، ليصبح استخدام الطاقة في غربي أوروبا أكبر بأربعة أضعاف متوسط الاستخدام الصيني لها.

قاد مبتكرون عمليون محليون فترة التطورات بالغة السرعة في أعقاب عام 1700. لكن يبقى النجاح الأعظم في القرن التاسع عشر موجهاً بالتأثيرات المتبادلة الوثيقة بين نمو المعرفة العلمية وتصميم الاختراعات الجديدة وتداولها تجارياً (روزينبيرغ Rosenberg وبيردزيل Birdzell أ1986؛ موكير 2002؛ سميل 2005). واشتملت أسس تطورات الطاقة في القرن التاسع عشر على تطوير المحركات البخارية وانتشار اعتمادها كمحركات أساسية ثابتة ومتنقلة على حد سواء، وكذلك اشتملت على صهر الحديد باستخدام فحم الكوك وإنتاج الفولاذ على نطاق واسع، فضلاً عن إدخال محركات الاحتراق الداخلي وتوليد الكهرباء. أما نطاق تلك التغيرات وسرعتها فقد جاء من توليفة جديدة للابتكارات المتعلقة بالطاقة آنفة الذكر وتركيبات كيميائية جديدة ونماذج أفضل مستوى لتنظيم الإنتاج في المصانع. وكان التطور الهائل لوسائل جديدة للنقل والاتصالات السلكية واللاسلكية أساسياً هو الآخر، حيث أسهم في تعزيز الإنتاج وتحفيز التجارة الوطنية والدولية على حدّ سواء.

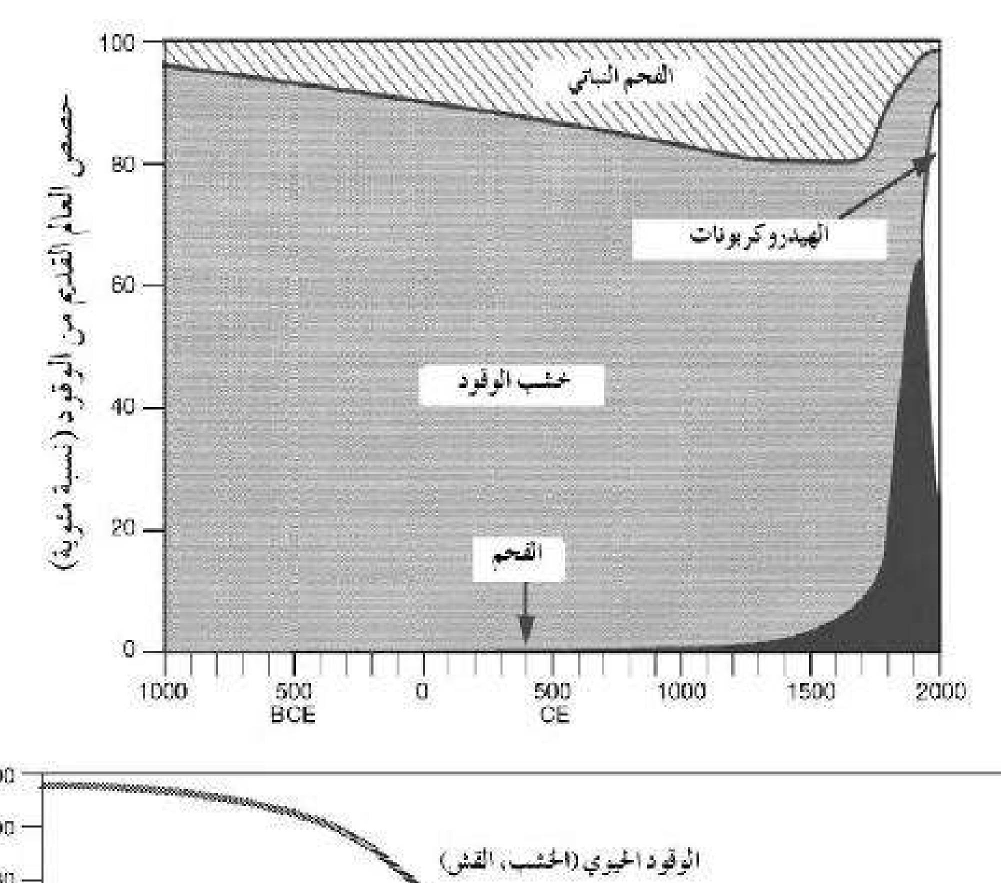
وبحلول عام 1900 أعطى تراكم الابتكارات التقنية والتنظيمية الغرب، بما في ذلك القوة الجديدة المتمثلة في الولايات المتحدة اليوم، السطوة على حصة غير مسبوقة من الطاقة العالمية. فالأمم الغربية التي لا تتعدى نسبتها 30% من سكان العالم كانت تستهلك آنذاك 95% من الوقود الأحفوري. وفي القرن العشرين زاد العالم الغربي من إجمالي استخدامه للطاقة بقرابة 15 ضعفاً.

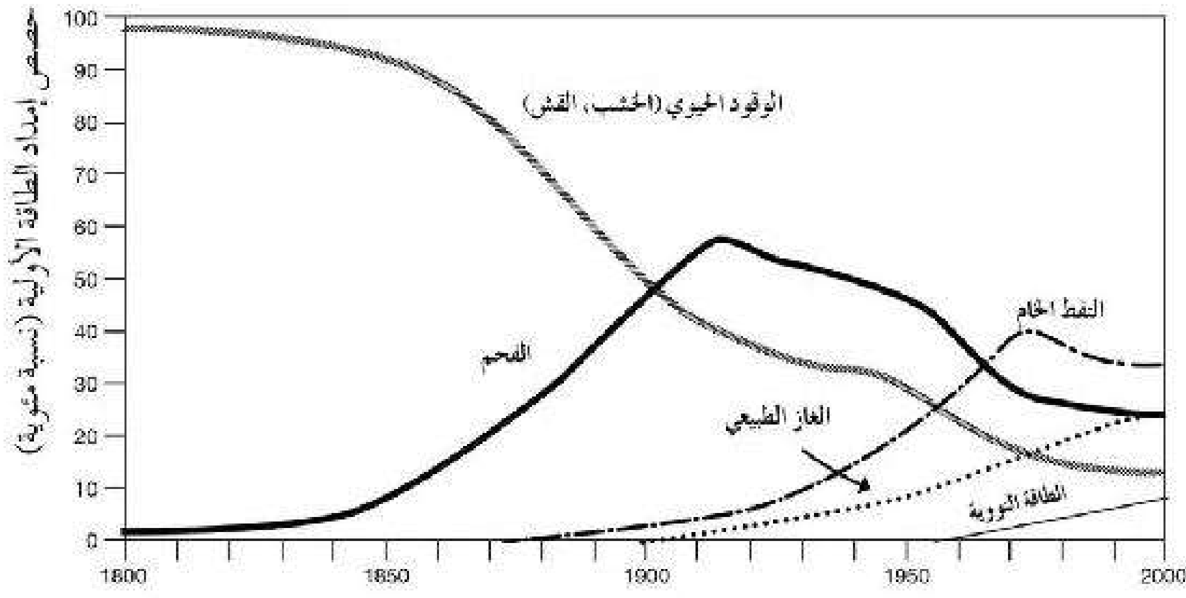
تراجعت حصته من استخدام الطاقة عالمياً بشكل محتوم، لكن مع نهاية القرن العشرين استهلك الغرب (الاتحاد الأوروبي وأمريكا الشمالية)، الذي يشكل أقل من 15% من سكان العالم، قرابة 50% من أشكال الطاقة الأولية التجارية كافة، لتبقى بذلك أوروبا وأمريكا الشمالية المستهلك المهيمن على الوقود والكهرباء على مستوى الفرد محتفظة بذلك في القيادة التقنية. وقد أدى النمو الاقتصادي السريع الذي شهدته الصين إلى تغيير الترتيب المطلق لها، إذ باتت أكبر مستهلك للطاقة على مستوى العالم عام 2010، متقدمة بذلك على الولايات المتحدة عام 2015 بنحو 32%، إلا أن استهلاك الفرد الصيني لم يتعد ثلث متوسط نظيره في الولايات المتحدة (الشركة البريطانية للنفط 2016).

لا نملك إلا تقديرات تقريبية إذا ما أردنا عرض الأنماط طويلة الأجل لاستهلاك الطاقة الأولية في العالم القديم (الشكل 7-3). ففي المملكة المتحدة، حل الفحم محل الخشب في القرن السابع عشر؛ وفي فرنسا وألمانيا لم تتراجع أهمية الخشب سريعاً إلا في أعقاب عام 1850؛ أما في روسيا وإيطاليا وإسبانيا فقد بقيت طاقات الكتلة الحيوية سائدة حتى القرن العشرين (جايلس Gales وآخرون 2007؛ سميل 2010أ). وحالما تصبح إحصائيات الطاقة الأساسية متاحة فسيكون من الممكن تحديد كم التحولات وإدراك موجات الاستبدال التي استمرت لفترة طويلة (سميل 2010أ؛ كاندر Kander ومالانيما Malanima ووارده Warde أ2013)، وهو ما يمكن القيام به عالمياً بدقة لا بأس بها منذ منتصف القرن التاسع عشر (الشكل 7-3). إلا أن معدلات الاستبدال اتسمت ببطئها، لكن فيما يتعلق بالعوامل المتنوعة التي تدخلت في عمليات الاستبدال هذه، نجد أنها كانت متماثلة على نحو مدهش.

إن إعادة بنائي للتحولات العالمية في استخدام الطاقة تبين أن الفحم (الذي حل محل الخشب) وصل إلى 5% من السوق العالمية قرابة عام 1840، وإلى 10% بحلول عام 1855؛ وإلى 20% عام 1870، و25% عام 1875، ثم إلى 33% عام 1885، و40% عام 1895 و50% عام 1900 (سميل 2010أ). وكان تسلسل السنوات المطلوبة للوصول إلى هذه النسب البارزة 15-25-30-35-45-55-60. أما الفواصل الزمنية لحلول النفط محل الفحم الذي وصلت نسبة الإمداد به إلى 5% من إجمالي الإمداد العالمي عام 1915 فكانت متطابقة تقريباً: 15-20-35-40-50-60 (لن يصل النفط إلى 50%، على الإطلاق ونسبته آخذة في التراجع). ووصل الإمداد بالغاز الطبيعي إلى 5% من الامداد العالمي بالطاقة الأولية عام 1930 وإلى 25% بعد 55 عاماً، واستغرق فترة أطول بكثير ليحقق تلك النسبة قياساً بالفحم أو النفط.

يبقى التطور المماثل للتحولات العالمية الثلاثة - التي استغرقت جيلين أو ثلاثة أجيال أو ما بين 50-75 سنة ليتمكن مصدر جديد من الاستئثار بنسبة كبيرة من السوق العالمية للطاقة - تطوراً ملحوظا نظراً لأن أنواع الوقود الثلاثة تتطلب تقنيات إنتاج وتوزيع وتحويل مختلفة، وكذلك نظراً لصعوبة نطاقات الاستبدال الشديدة: فالانتقال من 10% إلى 20% بالنسبة إلى الفحم تطلب زيادة الإنتاج السنوي للوقود بأقل من 4 إكسا جول، بينما احتاج الانتقال من 10% إلى 20% بالنسبة إلى الغاز الطبيعي إلى كمٍ إضافي من الطاقة بلغ قرابة 55 إكسا جول/السنة (سميل 2010أ). أما العوامل الأهم التي تفسر جوانب التشابه في وتيرة التحولات فتتمثل في الشروط الأساسية





الشكل 3-7

مخطط التقديرات التقريبية للنسب التي أسهمت بها أنواع الوقود الأساسية في الإمداد بالطاقة الأولية لدى العالم القديم في فترة 3.000 سنة الماضية (المخطط العلوي). إن إحصائيات دقيقة بمستوى لا بأس به لما بعد عام 1850 (باستثناء تلك المتعلقة باستهلاك وقود الكتلة الحيوية التقليدية) تميط اللثام عن موجات متعاقبة للتحول البطيء في الطاقة (المخطط السفلي): ففي عام

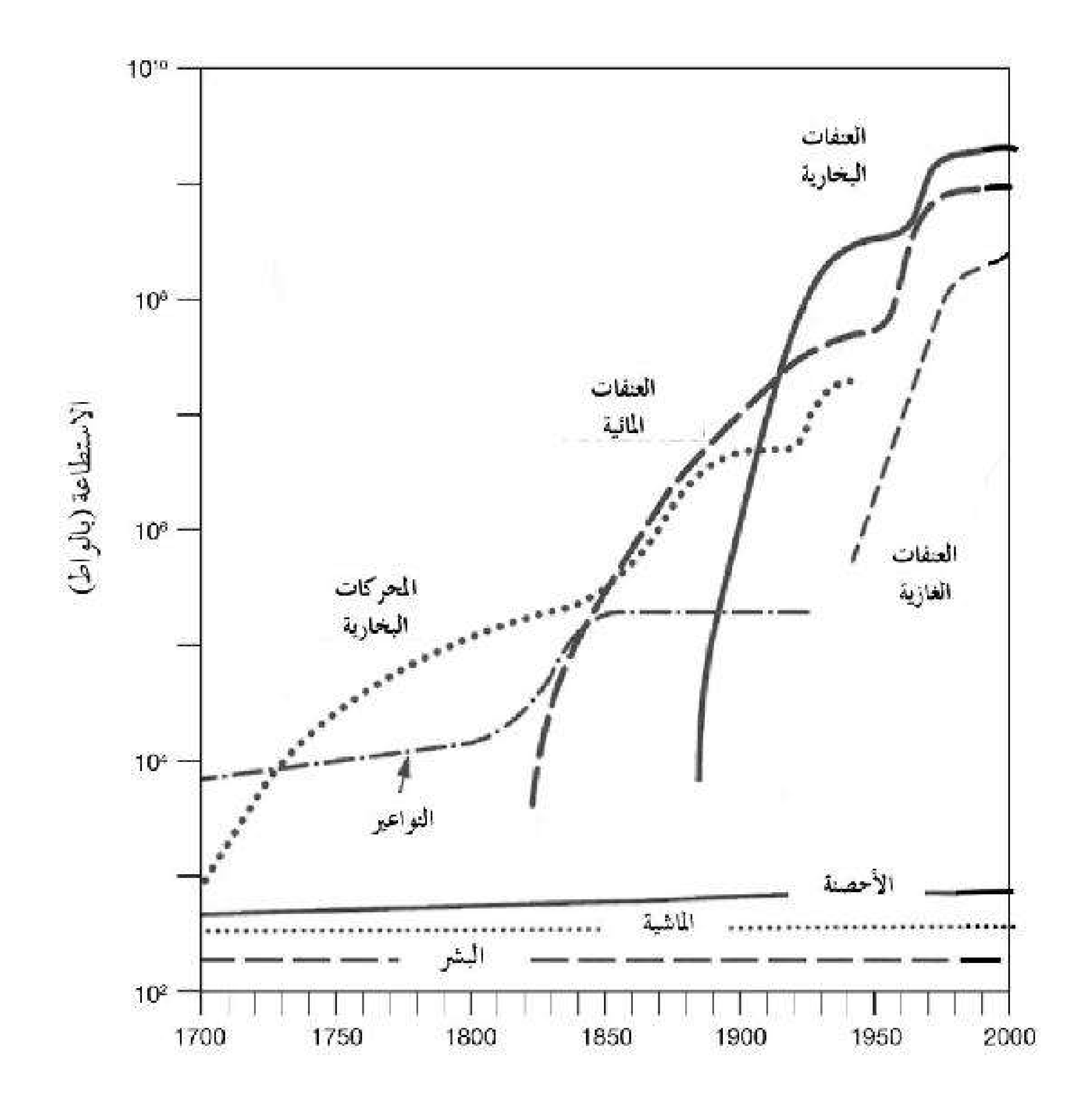
2010 كان النفط الخام الوقود الأحفوري الرائد، إلا أن الفحم والغاز الطبيعي لم يتخلفا عنه كثيراً. يستند المخطط إلى بيانات منظمة الأمم المتحدة (1956) وسميل (2010أ).

للاستثمار الهائل في البنى التحتية والقصور الذاتي لنظم الطاقة التي يتضمنها هذا الاستثمار.

صحيح أن تسلسل حالات الاستبدال الثلاث لا يعني أن الانتقال الرابع، الذي لايزال في مرحلته المبكرة اليوم (استبدال تحولات جديدة لتدفقات الطاقة المتجددة بأنواع الوقود الأحفوري) سيمضي بالوتيرة عينها، إذ تصب الاحتمالات بدرجة كبيرة في صالح عملية مديدة أخرى. ففي عام 2015 بقيت الطريقتان الجديدتان لتوليد الكهرباء من الطاقة المتجددة، الشمس (بنسبة 0.4%) والرياح (بنسبة 1.4%) أدنى من 2% من الإمداد العالمي بالطاقة الأولية (الشركة البريطانية للنفط 2016). إلا أن اختراقين مبكرين ظهرا ليسرّعا التحولات، وهما الإسراع في إنشاء محطات نووية جديدة اعتماداً على أفضل التصاميم المتاحة، وتوافر طرائق جديدة غير مكلفة لتخزين الكهرباء التي يتم توليدها من الرياح والطاقة الشمسية بكميات كبيرة. وحتى وقتها سنستمر في مواجهة تحديات استبدال مليارات الأطنان من أنواع الوقود السائل عالي كثافة الطاقة المستخدمة في النقل وإنتاج الحديد الصب والإسمنت والبلاستيك والأمونيا في غياب الكربون الأحفوري.

اتجاهات طويلة الأجل وانخفاض التكاليف

يمكن إجراء تتبع دقيق لحالات الانتقال المادية إلى وسائط تحريك أساسية أقوى من حيث نمطها واستطاعاتها القصوى (الشكل 7-4). فظرف الطاقة الذي يربط الاستطاعات القصوى للمحركات الأساسية تغير من نحو 100 واط للعمالة البشرية المستمرة إلى نحو 300-400 واط لحيوانات الجر في فترة ما من الألفية الثالثة قبل الميلاد؛ ليرتفع المنحى بعد ذلك ليصل إلى نحو 5.000 واط (5 كيلو واط) للنواعير الأفقية مع نهاية الألفية الميلادية الأولى. وفي عام 1800 تجاوزت الاستطاعة 100.000 واط (100 كيلو واط) في المحركات البخارية، حيث بقيت الوحدات الأقوى على الإطلاق حتى منتصف القرن التاسع عشر، حين اكتسبت العنفات المائية تفوقاً لفترة قصيرة ما بين عام 1850 و1910 (لتصل استطاعتها إلى 10 ميغا واط). بعد ذلك باتت العنفات البخارية أقوى وسائط التحريك الأولية المؤلفة من قطعة واحدة، لتصل إلى ذروتها بأكثر من 1.000.000.000 واط (1 جيغا واط) في أكبر الوحدات التي أنشئت بعد عام 1960.



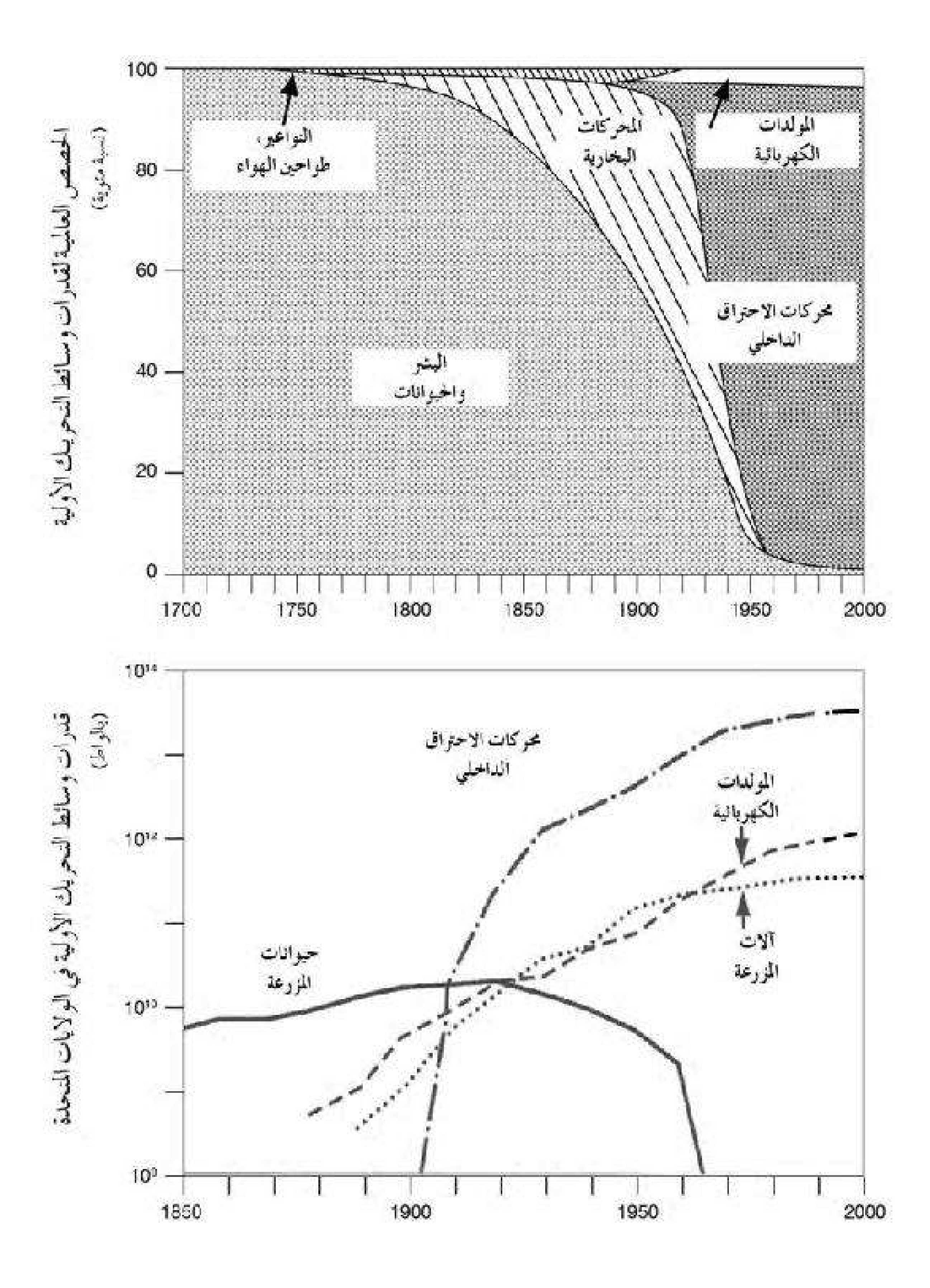
الشكل 7-4

الاستطاعات القصوى لوسائط التحريك الأساسية التي تعود إلى ما قبل عام 1700 وتلك التي أدخلت في القرون الثلاثة الأخيرة. وقد باتت أكبر المولدات التوربينية أقوى بست قيم أسية (أي نحو مليوني ضعف) قياساً بخيول الجر الثقيلة، أقوى وسائط التحريك الأولية الحية. وتفوقت المحركات البخارية النواعير قبل عام 1750، وفي عام 1850 باتت العنفات المائية أقوى وسائط التحريك الأولية لفترة قصيرة، لتصبح العنفات البخارية أقوى وسائط التحريك الأولية منذ

العقد الثاني للقرن العشرين. يستند المخطط إلى البيانات التي نوهنا إليها في الأقسام المتعلقة بوسائط التحريك الأولية النوعية.

بوسعنا التعرف على منظور مختلف من إلقاء نظرة على إجمالي استطاعات وسائط التحريك الأولية. فبعد عام 1700 يمكن تقريب النمط العالمي الأساس بمستوى لا بأس به، في حين تجعل الإحصائيات التاريخية العرض الرجعي سهلاً بالنسبة للولايات المتحدة (الشكل 7-5). وفي عام 1850 بقيت العمالة الحية تشكل أكثر من 80% من استطاعة وسائط التحريك الأولية في العالم. وبعد نصف قرن بلغت نسبتها نحو 60%، حيث وفرت المحركات البخارية قرابة ثلث تلك النسبة. وبحلول عام 2000 تم تركيب أنواع الطاقة كافة المتوافرة عالمياً باستثناء جزء يسير في محركات الاحتراق الداخلي والمولدات الكهربائية. في حين حل استبدال وسائط التحريك الأولية في الولايات المتحدة قبل تلك التغيرات العالمية. وما لا شك فيه أن محركات الاحتراق الداخلي (سواء أكانت في المركبات أم في الجرارات أم الحصادات أم المضخات) نادراً ما انتشرت للعمل لفترات طويلة قياساً بالمولدات الكهربائية إذ غالباً ما تعمل السيارات والآليات الزراعية أقل من 500 ساعة في العام، مقارنة بأكثر من 5.000 ساعة عمل للمولدات التوربينية. وبالتالي، على صعيد إنتاج الطاقة الفعلية تبلغ النسبة العالمية بين محركات الاحتراق الداخلي والمولدات الكهربائية اليوم نحو 1:2.

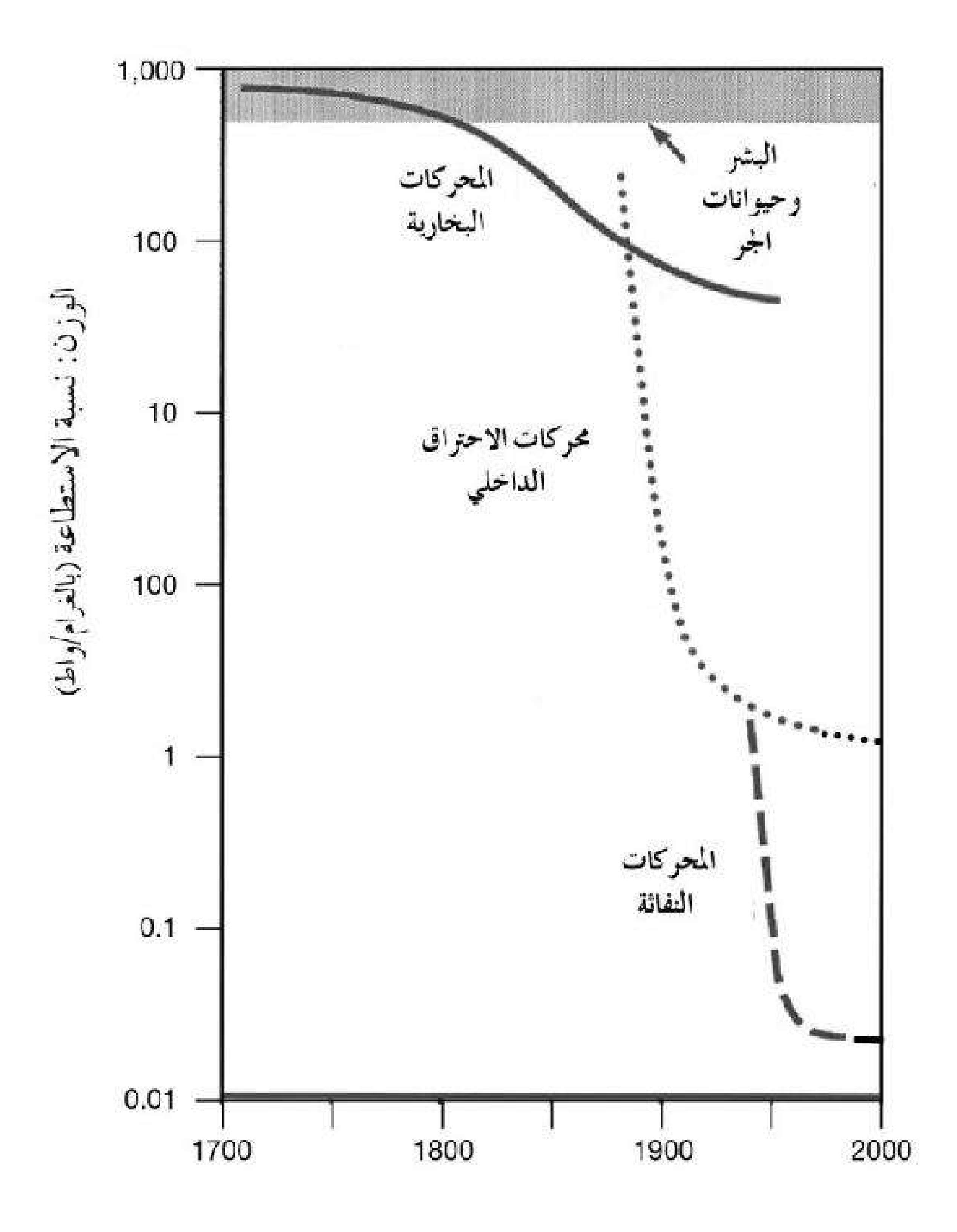
يتمثل الاتجاهان العامان المهمان اللذان رافقا نمو استطاعة وحدة المحركات الرئيسة غير الحية وتراكم إجمالي استطاعاتها في انخفاض نسب كتلتها/الطاقة (بإنتاج طاقة أكبر من وحدات أصغر)، وزيادة كفاءات تحويلها (إنتاج المزيد من العمل المفيد من الكم نفسه من مدخلات الطاقة الابتدائية). ودائماً ما جلب الاتجاه الأول محولات وقود أخف وزناً.وأكثر تنوعاً (الشكل 7-6). فبواكير المحركات البخارية، رغم كونها أقوى من الخيول بأشواط، كانت ثقيلة جداً نظراً لأن نسبة الكتلة/ الطاقة فيها كانت بالقيمة الأسية نفسها لتلك التي في حيوانات الجر. وقد أدت التطورات المتعاقبة لأكثر من قرنين من الزمن إلى خفض نسبة الكتلة/الطاقة في المحركات البخارية إلى نحو عُشر قيمها الابتدائية، لكن مع ذلك تبقى مرتفعة جداً بحيث يتعذر أن نراها تعمل على الطرقات أو لتغذية الطائرات بالطاقة.



النواعير،
طواحين الهواء
المحركات
البخارية
المولدات
الكهربائية
محركات الاحتراق
الداخلي
البشر
والحيوانات
100
80
60
40
20
0
1700
1750
1800
1850
1900
1950
2000
محركات الاحتراق
الداخلي
المولدات
الكهربائية
حيوانات
المزرعة
آلات
المزرعة
1850
1900
1950
2000

الشكل 7-5

تفاوتت نسب وسائط التحريك الأولية عالمياً عام 1700 بدرجة هامشية عن تلك قبل 500 أو حتى 1.000 عام. بالمقابل، تم بحلول عام 1950 تركيب الطاقة المتوافرة كافة عالمياً باستثناء جزء يسير منها في محركات احتراق داخلي (معظمها في سيارات الركاب) وكذلك في عنفات بخارية ومائية (المخطط العلوي). وتظهر الإحصائيات الأمريكية المفصلة (المخطط السفلي) هذا التحول السريع بمزيد من التفصيل والدقة. تم تقدير النسب العالمية ورسم مخططها اعتماداً على بيانات من منظمة الأمم المتحدة (1956)، سميل (2010أ)، وبالجرايف مكميلان Palgrave Macmillan أ(2013)؛ وأعد المخطط السفلي من بيانات مكتب الإحصاء الأمريكي (1975) ومن إصدارات لاحقة لـ الموجز الإحصائي للولايات المتحدة.



1,000
100
10
100
1
0.1
0.01
1700
1800
1900
2000
الوزن: نسبة الاستطاعة (بالغرام/واط)
المحركات
البخارية
البشر
وحيوانات
الجر
محركات الاحتراق
الداخلي
المحركات
النفاثة

الشكل 7-6

باتت كل المحولات الجديدة للطاقة غير الحية أكفأ وأخف وزناً. أما التراجع المطرد في نسبة الوزن/الاستطاعة في وسائط التحريك الأولية فيعني أن أفضل محركات الاحتراق الداخلي تزن اليوم أقل من 1/ 1.000 الوزن الذي كان عليه مكافئها من حيوانات الجر القوية أو بواكير المحركات البخارية. استند المخطط إلى بيانات منوه عنها في هذا الكتاب.

تراجعت نسبة الكتلة/الطاقة في محركات الاحتراق الداخلي (أولاً في محركات البنزين ومن ثم الديزل) بمقدار قيمتين أسيتين في أقل من 50 عاماً بعد أول الطرازات التجارية، حيث أدخلت المحركات الأفقية التي تعمل بوقود غاز الفحم في سيتينات القرن التاسع عشر. وفتح هذا الانخفاض الهائل الباب أمام ميكنة النقل على الطرقات البرية بتكلفة ميسورة (سيارات وحافلات وشاحنات) كما جعلت من الطيران مسألة ممكنة. وشهدت العنفات الغازية التي بدأت في ثلاثينيات القرن الفائت (للاستخدام الثابت وكذلك استخدامها في الطيران) تطورات مماثلة بنحو قيمتين أسيتين أخريين، ما أعطى إمكانية السفر جواً بالطاقة النفاثة السريعة بدءاً من عام 1958 وضمن نطاق واسع عقب إدخال الطائرات النفاثة العريضة، وعلى رأسها طائرة بوينغ 747 التي حلت في الصدارة عام 1969. وبالتزامن مع ذلك، ظهرت العنفات الغازية أيضاً كخيار رائد لتوليد الكهرباء بطريقة نظيفة ومرنة.

لكن كفاءات وسائط التحريك الأولية تبقى مقيدة باعتبارات ديناميكية حرارية أساسية. فقد عملت التطورات التقنية على تضييق الفجوات بين مستويات الأداء الفضلى والقيم العظمى من الناحية النظرية. وارتفعت كفاءات الآلات التي تعمل بالبخار من جزء من نسبة مئوية لمحركات سايفري البدائية إلى أكثر من 40% للمولدات التوربينية العملاقة في مطلع القرن الحادي والعشرين. لم يعد من الممكن اليوم تحسين المولدات التوربينية إلا بنسب هامشية وحسب، سواء أكانت تعمل بالبخار أم بالماء، إلا أن كفاءات العنفات الغازية ذات الدورة المركبة يمكن أن تصل إلى 60%. وبالمثل، يمكن لأفضل محركات الاحتراق اليوم أن تعطي أداءً يقترب من الحدود النظرية. إذ يمكن أن تصل كفاءة مراجل محطات الطاقة الضخمة وكذلك الأفران المنزلية التي تعمل بالغاز الطبيعي حتى 97%. بالمقابل، لايزال الأداء اليومي منخفضاً جداً لمحركات الاحتراق الداخلي، التي تمثل وسائط التحريك الأولية التي تتمتع بأكبر طاقة مركبة إجمالية. فمحركات السيارات التي لا تخضع لصيانة جيدة غالباً ما ينخفض أداؤها بنحو ثلث قيمته العظمى. أما التطورات على مستوى كفاءة الإنارة فهي تبهر الأنظار (المربع 7-2).

عملت وسائط التحريك الأولية الميكانيكية الأقوى والأكفأ والأخف على زيادة السرعات النمطية للسفر لمسافات بعيدة بأكثر من عشرة أضعاف على اليابسة وفوق الماء، كما جعلت من الطيران ممكناً (الشكل 7-7). ففي عام 1800 سجلت العربات التي تجرها الخيول أقل من 10 كم/سا، بينما تحركت عربات الشحن الأثقل بنصف

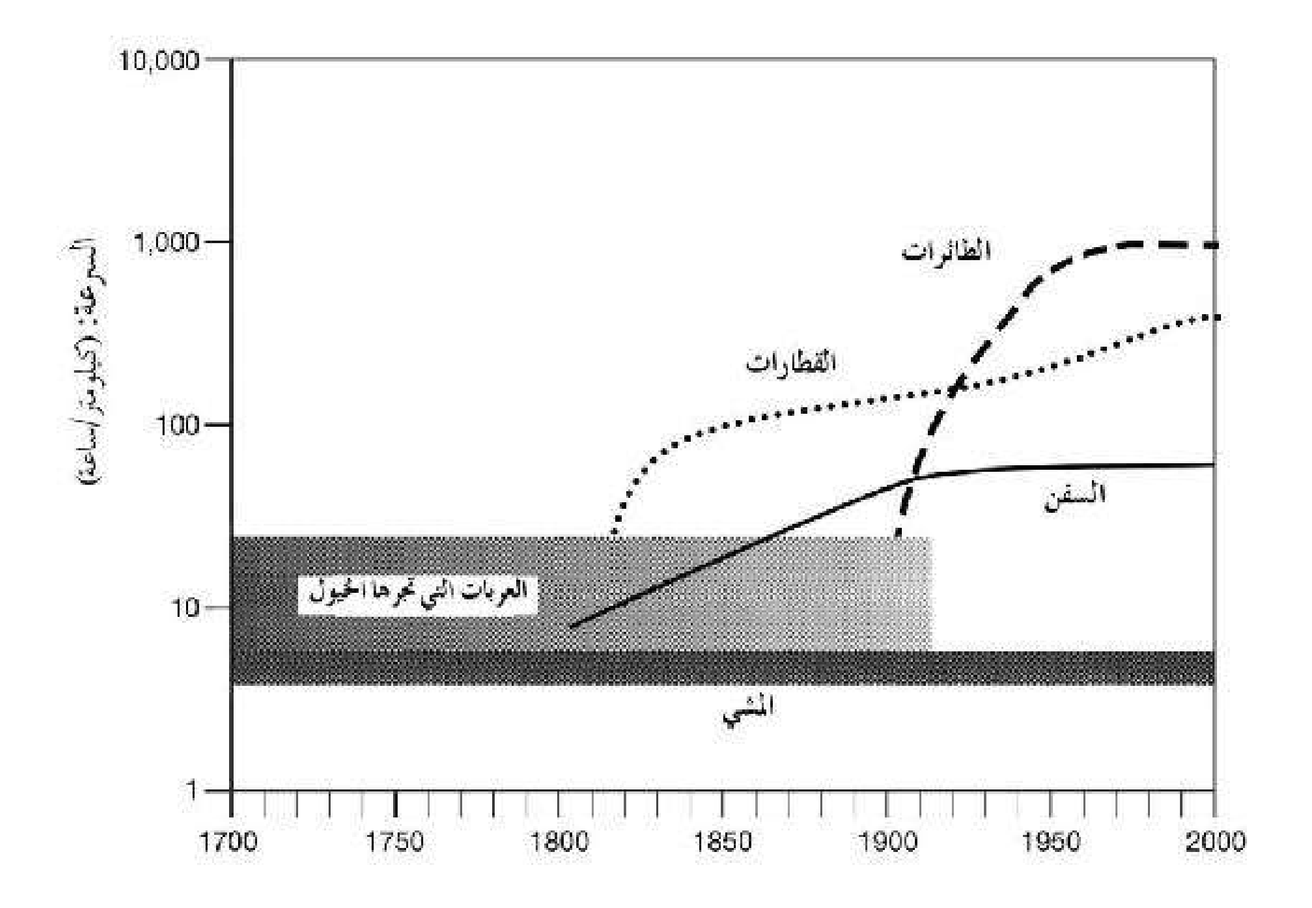
المربع 2-7

كفاءة الإنارة وفعاليتها

تحول الشموع نسبة ضئيلة لا تتعدى 0.01%، بينما لا تتعدى النسبة التي تحولها الطاقة الكيميائية للشمع أو الشحم أو البارافين المحروق إلى ضوء 0.04%. أما أول مصابيح أديسون، الذي استخدمت فيه حلقات بيضاوية الشكل من الورق المكربن المحمي بالبلاتين المشبوك مع أسلاك من البلاتين داخل زجاجة، فاستطاع تحويل 0.2% إلى ضوء، أي بقيمة أسية تفوق الشموع لكنه لم يكن أفضل من مصابيح الغاز المعاصرة آنذاك (0.15-0.3%). أما فتائل الأزميوم، التي تم إدخالها عام 1898، فحولت قرابة 0.6% من الطاقة الكهربائية إلى ضوء، ثم تضاعفت تلك النسبة بعد عام 1905 بوضع فتائل التنجستن ضمن حيز مفرغ الهواء، لتتضاعف مرة أخرى باستخدام غاز خامل داخل المصابيح. وفي عام 1939 رفعت أول مصابيح متوهجة الكفاءة إلى أعلى من 7%، كما تجاوزت النسبة 10% بأشواط بعد الحرب العالمية الثانية (2006).

إلا أن الطريقة الفضلى لتقدير هذه المكاسب تكمن في فعالية ألقها. فهذه النسبة بين التدفق الألقي والمشع (المعبر عنه بكمية الإضاءة في الواط، لومن/واط) تقيس الفعالية التي ينتج بها مصدر طاقة مشعة ضوءاً مرئياً، وتصل استطاعته القصوى إلى 683 لومن /واط. وفيما يلي فعالياًت الإضاءة مرتبة تصاعدياً، وجميعها معبر عنها بـ لومن /واط (ري 2000): شمعة 0.3؛ مصباح غاز، 102؛ أولى المصابيح المتوهجة، أقل من 5؛ المصابيح المتوهجة الحديثة، 10-15؛ أضواء فلورية (فلوريسنت)، حتى 100. أما مصابيح الصوديوم المنخفضة الضغط فهي المصدر التجاري الأكثر فعالية للإنارة (حيث تتجاوز استطاعتها القصوى 200 لومن/واط، إلا أن ضوءها المائل للصفرة يقتصر استخدامه على إنارة الشوارع فقط. وتعطي الدايودات الباعثة للضوء (LED)، المناسبة لأي استخدام داخلي، استطاعة تقترب من 100 لومن/واط، وقريباً ستتجاوز 150 لومن/واط (وزارة التعليم الأمريكية 2013).

تلك السرعة. وفي عام 2000 يمكن أن تزيد حركة السيارات على الطرقات السريعة عن 100 كم/سا، بينما اقتربت سرعات قطارات الركاب عالية السرعة من 300 كم/



الشكل 7-7

زادت السرعات القصوى لوسائط نقل الركاب من أقل من 20 كم/سا للعربات التي تجرها الخيول في الفترة التي سبقت عصر الخطوط الحديدية إلى أعلى من 100 كم/سا بأشواط بعد بضعة عقود فقط من التصاميم الأفضل للقاطرات. وتسير القطارات الحديثة السريعة عادة بين 200-300 كم/سا بينما تحلق الطائرات النفاثة بسرعة تفوق 900 كم/سا. استند المخطط إلى بيانات وردت في مصادر عديدة منوه عنها في أقسام هذا الكتاب المتعلقة بالنقل.

سا بل وتجاوزتها. أما سرعة تحليق الطائرات النفاثة القياسية فتتراوح بين 880 و920 كم/سا على ارتفاع 11 كم فوق سطح الأرض. وقد ترافقت زيادة السرعات بزيادة الطاقة الاستيعابية لنقل السلع والركاب ومجالاته.

وفي البر، بلغت هذه الثورة الميكانيكية ذروتها باستخدام الشاحنات متعددة المحاور والقطارات المخصصة لسلعة واحدة (التي تحمل حتى 10.000 طن من المواد) وقطارات الركاب الكهربائية (التي تتسع حتى 1.000 راكب). أما الناقلات العملاقة فتحمل حتى 500.000 طن من النفط

الخام، بينما تحمل أكبر طائرات الركاب، بوينغ 747 وإيرباص 380 نحو 500 راكب، كما يمكن لأكبر طائرة شحن، أنتونوف 225، أن ترفع 250 طناً. لقد كانت زيادة المسافة المقطوعة مثيرة للإعجاب أيضاً، إذ تصل أبعد مسافة يمكن لسيارة ركاب أن تقطعها من دون إعادة التزود بالوقود إلى أكثر من 2.600 كم، حيث سجل هذا الرقم القياسي عام 2012 بسيارة فولكس فاجن باسات TDI التي تعمل بمحرك ديزل (كويك 2012)، بينما يمكن لطائرة بوينغ 200LR -أ777 أن تطير لمسافة تزيد على 17.500 كم.

إلا أن زيادة سرعة نقل الركاب والسلع ومجالاته رافقها مقابل مدمر بزيادة سرعة مقذوفات الأسلحة ومداها المجدي. فقد كان المدى المجدي للرماح بضع عشرات الأمتار، بينما يمكن لرامي رمح متمرس أن يزيد هذه المسافة حتى 60 متراً. أما الأقواس ذات التركيبة الجيدة فكان بوسعها إطلاق أسهم خارقة لمسافة بين 500-700 م. وسرعان ما ارتفع هذا المدى مع استبدل البارود بالطاقة العضلية. فقبل عام 1500 تمكنت أثقل المدافع من إطلاق كرات حديدية بوزن 140 كغ لمسافة 1.400 م وكرات حجرية أخف وزناً لضعفي تلك المسافة (إيج Egg وآخرون 1971).

وفي مطلع القرن العشرين، ومع وصول مدى المدافع الميدانية الضخمة إلى عشرات الكيلومترات، فقدت المدافع تفوقها في إطلاق قذائفها التدميرية بعيدة المدى أمام القاذفات. إذ تجاوز مدى هذه القاذفات 6.000 كم، حيث كانت تطلق حتى 9 أطنان من القذائف، ومع نهاية الحرب العالمية الثانية، ظهرت الصواريخ الباليستية التي بدورها تفوقت على القاذفات (سبيناردي Spinardi أ2008). ومع مطلع ستينيات القرن الفائت، بات بإمكان تلك الصواريخ حمل قنابل نووية أشد تدميراً وأعلى دقة إما من منصات برية أو من غواصات إلى أي بقعة على الأرض. أما زيادة المدى من القوس المركبة العتيقة التي استخدمت في العالم القديم إلى الصاروخ الباليستي في أواخر القرن العشرين فكانت بنحو 30.000 ضعف، في حين ارتفعت القوة التدميرية للصاروخ بنحو 16 قيمة أسية قياساً بالسهم.

لم تكن اتجاهات الاستهلاك طويلة الأجل، بالقيمة المطلقة والقيمة النسبية، أقل إبهاراً. فعلى النطاق العالمي، وصل إجمالي تدفقات الطاقة الأولية، بما في ذلك أنواع الوقود الحيوي التقليدية، إلى 20 إكسا جول عام 1800، وإلى قرابة 45 إكسا جول عام 1900، و100 إكسا جول عام 1950، لترتفع قليلاً عن 380 إكسا جول عام 2000، بينما وصلت عام 2015 إلى أكثر من 550 إكسا جول. ما يعني زيادة سنوية في استطاعات الطاقة من 650 جيغا واط عام 1800 إلى 12.2 تيرا واط عام 2000، أي بنحو 20 ضعفاً في قرنين من الزمن، وبزيادة أكثر من 40% عام 2015 لتصل إلى نحو 17.5 تيرا واط. وكانت الزيادة في استخراج الوقود الأحفوري بين عام 1800 و2000 قرابة 900 ضعف، وذلك من كمية من دون 0.4 إكسا جول إلى ما يزيد على 300 إكسا جول. كما تسبب ارتفاع استخدام الطاقة في تغيرات جوهرية طالت استهلاك الفرد الأنموذجي على المستويين المطلق والنسبي.

كانت احتياجات المجتمعات الرعوية من الطاقة محكومة بتوفير الغذاء والملابس الأساسية والمأوى المؤقت. أما الثقافات العالية القديمة فقد وجهت الارتفاع البطيء في استخدام الطاقة إلى إيجاد مأوى دائم، وتنوع أكبر في الأغذية المزروعة والمصنعة، ومستوى أفضل من الملابس والنقل مع تنوع

الجهات المصنعة (حيث كان الفحم النباتي المصدر السائد للإمداد بالحرارة اللازمة لصهر الفلزات وشي الآجر). وتمكنت طلائع المجتمعات الصناعية، التي امتلكت عدداً أكبر من الحيوانات المدجنة، والتي استخدمت الطاقة الحركية للنواعير وطواحين الهواء، وارتفع لديها استخراج الفحم، من مضاعفة استخدام الفرد للطاقة بسهولة والذي ساد في أوج العصور الوسطى.

اتجه جل هذه الزيادة في البداية إلى التصنيع والإنشاء والنقل (بما في ذلك الأعمال المكثفة لتطوير البنى التحتية)، إلا أن ارتفاع استخدام مصادر الطاقة بشكل شخصي وفق المقتضيات لا تغطيه التقارير الاعتيادية الخاصة باستخدام القطاعات للطاقة: على سبيل المثال، تظهر إحصائيات الوكالة الدولية للطاقة أنه في عام 2013 كانت نسبة لا تتعدى 12% من استخدام الطاقة الأولية في الولايات المتحدة داخل المنازل، بينما تقدر الوكالة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة تلك النسبة (بما في ذلك الكهرباء كافة والفاقد أثناء توليدها) بـ 22%، في حين كانت النسبة الفعلية (بما فيها النسب الكبيرة لاستخدام الطاقة المصنفة ضمن الفئة التجارية وفئة النقل) أعلى من 30% بأشواط.

كان إمداد الفرد بالطاقة في الولايات المتحدة مرتفعاً أصلاً إلى حد ما عام 1900، وبالتالي سجلت نسبة إمداد الفرد في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين زيادة بمقدار ضعفين ونصف «فقط» (330 مقابل 132 جيغا جول/فرد). بينما شهد استهلاك الفرد للطاقة في اليابان بين عامي 1900 و2015 ارتفاعاً بمقدار 15 ضعفاً، في حين كانت الزيادة عشرة أضعاف في الصين. وبفضل الارتفاع المطرد في معدل كفاءات التحويل، كانت الزيادات في استهلاك الفرد للطاقة المفيدة أعلى بكثير، إذ كانت، تبعاً لكل بلد، أعلى بأربعة أضعاف على أقل تقدير، لتصل إلى خمسين ضعفاً في القرن العشرين. وبكفاءة طاقة إجمالية لا تتعدى 20%، استهلكت الولايات المتحدة ما يربو على 25 جيغا جول/طن من الطاقة المفيدة عام 1900، لكن في عام 2000، وبمعدل كفاءة يبلغ 40%، وصلت النسبة إلى نحو 150 جيغا جول/فرد، أي بارتفاع سبعة أضعاف في قرن من الزمن. وتظهر أفضل حساباتي المتعلقة بالصين ارتفاعاً من 0.3 جيغا جول/فرد من أنواع الطاقة المفيدة عام 1950 إلى نحو 15 جيغا جول عام 2000، أي بزيادة 50 ضعفاً في فترة جيلين فقط.

وتقدم البيانات البريطانية الواردة في إصدار فوكيه Fouquet أ(2008) توضيحاً للمكاسب المفيدة المذكورة ضمن فئات استهلاك الطاقة الرئيسة لفترة 250 عاماً بين 1750 و2000. فبالنسبة إلى أنواع الطاقة الصناعية كافة (التي وفرتها عام 1750 العمالة الحية، والنواعير، وطواحين الهواء، وبعض المحركات البخارية؛ بينما وفرت معظمها في عام 2000 المحركات الكهربائية ومحركات الاحتراق الداخلي) كانت الزيادة 13 ضعفاً في فترة 250 عاماً؛ و14 بالنسبة لتدفئة المكان؛ أما لأنواع نقل الركاب كافة (عام 1750 الخيول والعربات المكشوفة والعربات المغلقة والعبارات والسفن الشراعية؛ وفي عام 2000، المركبات والسفن التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي ومعظم الطائرات التي تعمل بالمحركات النفاثة) فكانت بنحو 900؛ و(كما أشرنا سابقاً) احتلت المكاسب على مستوى الإنارة أعلى القائمة، حيث استهلك الشخص البريطاني العادي عام 2000 من الإنارة ما يزيد بنحو 11.000 ضعف على نظيره عام 1750.

تعد الزيادة بالأضعاف الواردة أعلاه لتتبع المكاسب في خدمات الطاقة المفيدة أكثر القياسات إيضاحاً للطاقة نظراً لأنها تفسر المكاسب الهائلة في الاستطاعة الإنتاجية ونوعية الحياة والقدرة غير المسبوقة على التنقل، وكذلك الكم الكبير من الإنارة التي تظهرها صور السواتل الملتقطة ليلاً (إن ألقى أحد الكائنات الفضائية نظرة على الأرض) لمناطق واسعة من أوروبا وأمريكا الشمالية وآسيا كبقاع من الألق المستمر. إلا أن الكفاءات الأعلى للطاقة تراجعت بفعل اجتماع تنامي الطلب وارتفاع عدد السكان، ورغم تحول الاقتصاد العالمي إلى مستوى أدنى من كثافة استخدام الطاقة نسبياً، إلا أن إجمالي استخدامه للطاقة يشهد زيادة، كما أظهرت بعض أكثر الاقتصادات المتطورة تشبعاً حيال معدل طلب الفرد على الطاقة في العقود الثلاثة الأخيرة.

وفي الوقت ذاته، أمست الطاقة المستخدمة لتوفير الضرورات المادية للحياة أصغر دائماً من جوانب الاستهلاك المتزايد، إذ بات إنتاج السلع على اختلاف أنواعها، وتوفير عدد لا يحصى من الخدمات، بالإضافة إلى أنشطة النقل والترفيه يستهلك الكم الأكبر من الوقود والكهرباء في البلدان كافة التي تنعم بالرخاء؛ وهذا النمط ينطبق على الزيادة في عدد المناطق المتحضرة التي تعيش حياة الرخاء في جميع البلدان المكتظة التي تسير على طريق الحداثة وعلى رأسها الصين والهند والبرازيل. كما كانت مكاسب الكفاءات على المدى البعيد السبب الأهم للتراجع الكبير في أسعار الطاقة (قياساً بالقيمة المعدلة بعد حساب التضخم).

وأظهر كاندر Kander أ(2013) أن الأسعار الحقيقية للطاقة في أوروبا الغربية في القرن العشرين تراجعت بنسبة 75%، حيث تراوح التراجع من 80% في المملكة المتحدة إلى 33% في إيطاليا. وقد عرض فوكيه (2008) بعضاً من أهم الاتجاهات طويلة الأجل (والتي جرت مقارنتها بشكل صحيح وفق قيمة ثابتة للعملات أو وفقاً لوحدة الأداء النوعي أو الخدمة المقدمة)، مستفيداً من بيانات الأسعار الإنجليزية، التي يعود بعضها إلى العصور الوسطى. فبين عامي 1500 و2000 انخفضت تكلفة التدفئة المنزلية بنحو 90%، بينما تراجعت تكلفة الطاقة الصناعية بنسبة 92%، وتكلفة نقل الشحن البري بنسبة 95%، والشحن البحري بنسبة 98%، لكن ما يثير الدهشة أكثر يبقى انخفاض تكلفة الإنارة.

اجتمع انخفاض تكلفة الوقود المستخدم لتوليد الإنارة مباشرة أو عن طريق الكهرباء مع ارتفاع كفاءة أجهزة الإنارة لتحقيق انخفاض ملموس في تكلفة خدمات الإنارة (المال/المصباح) التي لا يعادلها أي نوع من أنواع تحويل الطاقة. ففي عام 2000 كانت تكلفة مصباح في بريطانيا تعادل 0.01% فقط من تكلفته عام 1500 ونحو 1% من تكلفته عام 1900 (فوكيه 2008). ويرى نوردهاوس Nordhaus أ(1998) أن تكلفة الإنارة في الولايات المتحدة في نهاية القرن العشرين كانت أدنى بأربع قيم أسية (حيث كانت نسبة الكسر الفعلي نحو 0.0003) قياساً بما كانت عليه عام 1800. وانخفضت أسعار الكهرباء الحقيقية بنسبة 97-98% في القرن العشرين في كل من أوروبا وأمريكا الشمالية (كاندر 2013)، عندما ترافق هذا الانخفاض مع زيادة في صافي دخل الفرد، مع زيادة وصلت حتى قيمة أسية في كفاءة التحويل، ما يعني أن وحدة خدمة الكهرباء عام 2000 في الولايات المتحدة كانت أكثر قابلية للاقتناء على الأقل بنحو 200 ضعف، وحتى 600 ضعف قياساً بعام 1900 (سميل 2008أ). ومنذ عام 2000 لم يتعد إجمالي إنفاق

الأسرة الأمريكية العادية على الطاقة 4-5% من صافي دخلها المتاح، وهذه صفقة رائعة إذا ما أخذنا بعين الاعتبار حجم السكن الأنموذجي وكثافة النقل (الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2014).

يمثل هذا التراجع في الأسعار بأشكاله اتجاهات كافة لا خلاف عليها، لكن في الوقت عينه، يجب ألا ننسى أن تلك الاتجاهات كافة ستبدو مختلفة من الناحية الافتراضية لو أن أسعار الطاقة عكست بشكل كامل العوامل الخارجية المتنوعة بما في ذلك التأثيرات البيئية والصحية المرتبطة باستخراج الوقود والنقل والتصنيع والاحتراق، والطرائق المختلفة المتبعة في توليد الكهرباء. إلا أن الحال لم تكن سياناً في كل مكان. فبعض العوامل الخارجية، بما فيها الاستحواذ على مادة معينة ونزع الكبريت من غاز المداخن، باتت عوامل داخلية بدرجة كبيرة، بينما تم تجاهل عوامل أخرى أبرزها أن الوقود الأحفوري لم يتحمل التكلفة النهائية لارتفاع حرارة الأرض الناجم عن غاز ثاني أكسيد الكربون. أضف إلى ذلك أن معظم أسعار الطاقة- بغض النظر عن تلك التي تعرف باقتصادات السوق الحرة أو في البلدان التي تطبق فيها سياسات اقتصادية صارمة وموجهة، سواء في البلدان ذات الدخل المرتفع أم المنخفض - خضعت للدعم وبنسبة كبيرة في الغالب، وهذا يعود بمعظمه إلى تجاهل العوامل الخارجية، من خلال فرض نسب ضرائب منخفضة أو باعتماد سياسات تعامل قائمة على التمييز (المربع 7-3).

ما الذي بقي من دون تغيير؟

لو أخذنا بعين الاعتبار الطبيعة الجوهرية للتطورات الموجهة بالطاقة لوجدنا أن طرح هذا السؤال يبقى مقبولاً - أما الإجابة البسيطة والواضحة عنه فهي بلا شك أن اعتماد الجديد من مصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية وانتشارها كان السبب المادي الرئيس وراء التغيرات الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، حيث تمكن هذا الاعتماد والانتشار افتراضياً من تحويل جميع أشكال المجتمعات الحديثة، وهي عملية لازمتنا على الدوام، إلا أن وتيرتها أخذت بالتسارع. أما التغيرات التي شهدتها عصور ما قبل التاريخ والتي جلبت معها أدوات أفضل، إلى جانب السيطرة على النار، واتباع استراتيجيات أفضل في الصيد فقد كانت تغيرات بطيئة جداً، حيث استغرق انتشارها عشرات آلاف السنين. وبالمثل استمر اعتماد الزراعة الدائمة وتكثيفها لاحقاً آلاف السنين أيضاً، ولعل أهم آثاره زيادة الكثافة السكانية،

المربع 7-3

دعم الطاقة

قدم صندوق النقد الدولي (صندوق النقد الدولي 2015) دعماً للطاقة على المستوى العالمي بأكثر من ضعفي المبلغ الذي قدره بالأساس عام 2011 بقيمة 2.0 تريليون دولار، حيث بلغت قيمة

الدعم 4.2 تريليون دولار، بينما بلغ إجمالي دعمه عام 2015 5.3 تريليون دولار، أو نحو 6.5% من الناتج الاقتصادي العالمي. ويعود جل هذا الدعم بأصله إلى عدم جباية مبالغ كافية مقابل الأعباء البيئية والصحية وغيرها من العوامل الخارجية (بما في ذلك الاختناقات المرورية والحوادث). وكانت الصين، التي تحرق كميات هائلة من الفحم، الجهة الداعمة الأساس بالقيمة المطلقة (بنحو 2.27 تريليون دولار عام 2015)؛ بينما وصل دعم أوكرانيا حتى 60% من إجمالي الناتج المحلي؛ في حين احتل الدعم القطري للفرد المرتبة الأولى، حيث وصل إلى نحو 6.000 دولار لكل مواطن. واستخدمت موجة جديدة من دعم الطاقة لوضع أسس توليد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح ومن ثم توسيعها، حيث يشكلان الطريقتين الرائدتين لإنتاج الكهرباء المتجددة وتخمير المحاصيل النشوية لإنتاج الإيثانول المخصص للسيارات (تشارلزCharles وودرز Wooders أ2011؛ ألبيريسي Alberici وآخرون 2014؛ الإدارة الأمريكية للمعلومات المتعلقة بالطاقة 2015ج).

وبالتالي بروز تقسيمات طبقية اجتماعية، وتخصصات مهنية، وتحضر أولي. وأمست المجتمعات عالية الطاقة التي نشأت نتيجة ارتفاع استهلاك الوقود الأحفوري تشهد ذروة التغييرات، ما أسفر عن انتشار واسع لهاجس الحاجة المستمرة إلى الابتكارات.

انتشرت مجتمعات الصيد والجمع وفق كثافات مختلفة فوق مسافات واسعة لم تتعد شخصاً واحداً في الكيلومتر المربع إذا ما استبعدنا بعض المزارع في المناطق الساحلية. لكن حتى مع أدنى مستويات التحول في الإنتاجية استطاعت الزراعة أن ترفع هذه النسبة بما لا يقل عن عشرة أضعاف. وأسفرت الزراعة الدائمة للمحاصيل عن زيادة عشرة أضعاف أخرى. كما تطلب تكثيف الزراعة التقليدية مستلزمات أعلى من الطاقة. ولطالما بقيت العمالة الحية المحرك الأساسي الوحيد في العمل الحقلي، فإننا سنرى أن نسبة السكان المنخرطين في زراعة المحاصيل وتربية الحيوانات مرتفعة جداً بنسبة تزيد على 80%، وحتى أكثر من 90% في العادة. ومع أن صافي إيرادات الطاقة جراء تكثيف الزراعة التي تشتمل على الري، وصناعة المصاطب الجبلية، وزراعة محاصيل عدة في آن واحد، واتباع دورات زراعية، وتطبيق التسميد كان أدنى عموماً من إيرادات الزراعة الخفيفة محدودة المستلزمات، إلا أنه أتاح وجود كثافات سكانية بمعدلات غير مسبوقة.

لقد دعمت الزراعة التقليدية التكثيفية -والمتمثلة بصورتها الأبرز في زراعة محاصيل متعددة على مدار العام في آسيا لدعم النظم الغذائية النباتية فيها دعماً كبيراً- أكثر من خمسة أشخاص في الهكتار الواحد من الأرض المزروعة. وأدت كثافات كهذه إلى تحضر تدريجي، إلا أن نمو المدن والتجارة على نطاق واسع، والاندماج الفعال الذي شهدته الإمبراطوريات الآخذة في الاتساع اتسم بالتقييد لأسباب عدة أبرزها بطء النقل البري وانخفاض طاقته الاستيعابية. لكن في المجتمعات الساحلية جاء الدعم جراء تطور قدرات السفن الشراعية، التي استخدمت للتجارة المزدهرة بين القارات وكذلك لاستعراض القوة في مشارق الأرض ومغاربها.

وإزاء بطء التحولات التراكمية لدى المجتمعات التقليدية، كانت التبعات الاجتماعية والاقتصادية الناجمة عن التحول الصناعي القائم على الوقود الأحفوري تبعات آنية. فقد أدى استبدال الوقود الأحفوري بوقود الكتلة الحيوية ولاحقاً استبدال الكهرباء ومحركات الاحتراق الداخلي بالطاقة الحية إلى عالم جديد في بضعة أجيال فقط (سميل 2005). وكانت التجربة الأمريكية أكبر مثال عن تلك التغيرات المضغوطة. فأكثر من أي أمة حديثة أخرى، وجدت قوة الولايات المتحدة وتأثيرها نتيجة الاستخدام المرتفع للطاقة على نحو استثنائي (شور Schurr ونيتشيرت Netschert أ1960؛ جونز Jones أ1971؛ جونز 2014؛ سميل 2014ب). ففي عام 1850 طغت على البلد بأسره الصبغة الريفية إذ كان يعتمد على استخدام وقود الخشب، ويحظى بواردات عالمية هامشية. لكن بعد قرن من الزمن - وعقب زيادة استهلاك الفرد للطاقة المفيدة بأكثر من ثلاثة أضعاف، وتحول المجتمع إلى أكبر منتج ومستهلك للوقود الأحفوري على مستوى العالم والمبتكر الرائد للتقنيات قادرٍ على تحويل تلك المزايا إلى انتصار ساحق في الحرب العالمية الثانية - باتت الولايات المتحدة القوة العظمى اقتصادياً وعسكرياً والمبتكر الرائد للتقنيات في العالم.

أما أبرز التحولات المادية في العالم الجديد القائم على الوقود الأحفوري فقد أوجدتها العمليات المتشابكة بين التحول الصناعي والتحضر. وانطلقت تلك العمليات من تحرير مئات ملايين الأشخاص من العمالة الجسدية الشاقة وتوفير إمداد متزايد من الغذاء بأنواعه، فضلاً عن تحسن ظروف السكن. وقد أدى اجتماع الزراعة عالية الإنتاج مع توافر فرص عمل جديدة ضمن قطاع الصناعات الآخذ في الاتساع إلى موجات هجرة بأعداد كبيرة من القرى وكذلك تحضر سريع مستمر شهدته القارات بأسرها. وهذا التغيير بدوره حمل تأثيراً إيجابياً هائلاً طال استخدام الطاقة عالمياً. وأدت متطلبات إنشاء البنى التحتية في الحياة الحضرية إلى زيادة معدل استهلاك الفرد للطاقة إلى مستوى تجاوز المتوسطات الريفية حتى في المدن التي لم تشهد تحولاً صناعياً كبيراً. ولم تكن تلبية تلك الاحتياجات من الكثافة العالية للطاقة نسبياً ممكنة لولا توافر وسائط رخيصة تستخدم في نقل الأغذية والوقود، ولولا توافر الكهرباء فيما بعد.

أتاحت ميكنة الإنتاج بالجملة في المصانع التي تعمل بالوقود الأحفوري والكهرباء إمكانية إنتاج سلع عامة بكميات كبيرة، ووفرت سلعاً أكثر عالية الجودة وبأسعار ميسورة. كما أدخلت مواد جديدة (معادن وبلاستيك ومواد تركيبية)، كما عملت على تكثيف التجارة والنقل والاتصالات السلكية واللاسلكية التي باتت جميعها اليوم عالمية المستوى بالفعل ومتاحة لكل من لديه صافي دخل مقبول (حيث باتت تجارب التجمعات والاصطباغ بطابع تجاري من النتائج الحتمية، وهو ما يتضح من جموع السياح المنتشرين بكل موقع سياحي أو مشهد جميل لإلقاء نظرة على عجل، أو التقاط الصور الذاتية «السلفي» باستخدام العصا المخصصة).

وعملت تلك التطورات أيضاً على تسريع كل وجه من أوجه التغير الاجتماعي. إذ كسرت الدورة التقليدية للآفاق الاجتماعية والاقتصادية المحدودة، وأول مثال على ذلك (إذا ما نحينا جانباً العلاقة العكسية بين حجم التواصل ونوعيته) الوصول إلى مليارات من مستخدمي «وسائل التواصل الاجتماعي»، والمثال الثاني يتمثل في النتائج العكسية الناجمة عن الاستعانة بخبرات خارجية وإجراء تعاقدات فرعية لتنفيذ أنشطة صناعية (نتيجة ارتفاع تكاليف النقل الملازمة للعملية وغياب

ضبط الجودة بالشكل المناسب). كما أدت تلك التطورات إلى تحسين المستوى الصحي وارتفاع متوسط العمر، وهي منافع شبه عالمية (لكنها انعكست في عبء التعامل مع المسنين). ونشرت كذلك التعليم الأساسي والتعليم العالي (رغم أن منح الدرجات الجامعية كافة لأعداد كبيرة قد خفض من قيمتها) وأتاحت شيئاً من الرخاء لنسبة متزايدة من سكان العالم. كما وسعت المجال أمام الديمقراطية وحقوق الإنسان (إلا أنها بالتأكيد لم تجعل العالم أكثر ديمقراطية بحق).

هنا يجب أن نضع الكهرباء ضمن إطار متميز نظراً لأدوارها العديدة والفريدة. فالاعتماد على أكثر أشكال الطاقة مرونة وملاءمة سرعان ما تطور إلى اعتماد شامل. فلولا الكهرباء لما استطاعت المجتمعات مزاولة الأنشطة الزراعية وتناول الطعام بالشكل الذي هو عليه اليوم، فالكهرباء تزود الضواغط بالطاقة داخل مصانع الأمونيا وكذلك الضواغط في الثلاجات المنزلية. ولما أمكننا الوقاية من الأمراض (التي باتت تحت السيطرة اليوم بفعل اللقاحات المبردة) أو رعاية المرضى (الذين يعتمد تشخيص حالاتهم على أجهزة تعمل بطاقة الكهرباء، من آلات التصوير بالأشعة السينية العظيمة إلى أحدث أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي، والمراقبة الواسعة في وحدات العناية المركزة)، والتحكم بشبكات النقل لديهم، أو التعامل مع الكم الهائل من المعلومات (حيث باتت مراكز البيانات من أكبر القطاعات المستهلكة للكهرباء) أو مع الصرف الصحي في المدن.

وبالطبع لولا الكهرباء لما تمكنت المجتمعات الحديثة من تشغيل وإدارة صناعتها لإنتاج كم كبير من السلع بتنوع أكبر وجودة أعلى مع تكلفة أيسر. فقد أدى هذا الإنتاج إلى إلغاء جلّ التقسيم الذي ساد قديماً بين نوع من الكماليات رفيعة المستوى التي تنتج بكميات محدودة لمصلحة نخبة من الأغنياء ومجموعة محدودة من المصنوعات المتواضعة المتاحة للعموم. وقد وجدت نسبة من هذا الإنتاج المتقدم طريقها نحو السوق العالمية. ففي عام 2015 شكلت التجارة الخارجية نحو 25% من إجمالي الإنتاج الاقتصادي العالمي، قياساً بأقل من 5% عام 1900 (البنك الدولي 2015ج). وتسارع هذا الاتجاه مع توافر وسائط نقل سريعة وموثوقة ومع الاتصالات السلكية واللاسلكية الإلكترونية الفورية. لقد عمل الوقود الأحفوري والكهرباء على نقل العالم من الصورة الفسيفسائية للسيادة الاقتصادية المطلقة والآفاق الثقافية المحدودة إلى كيان واحد يزداد ترابطاً يوماً بعد يوم.

أما التحولات الأخرى التي لا تقل أهمية في عصر الوقود الأحفوري فقد اشتملت على بنى جديدة للعلاقات الاجتماعية، لعل أهمها النظام الجديد لتوزيع الثروة. فالتغيير من التوظيف المؤقت إلى العقود أدى إلى المزيد من الاستقلالية على الصعيدين الشخصي والسياسي، حيث أوجد هذا التحول نظم عمل جديدة (لاسيما ساعات الدوام المحددة والهياكل التنظيمية متعددة المستويات)، فضلاً عن تجمعات اجتماعية جديدة ذات اهتمامات خاصة (كنقابات العمال والإدارة والمستثمرين). كما شكلت منذ بدايتها تقريباً تحديات جديدة على المستوى الوطني، كان على رأسها الحاجة إلى التأقلم مع الحالات المتطرفة للنمو الصناعي السريع على المستوى الإقليمي والتراجع الاقتصادي المزمن. واستمر تأثير هذا التفاوت حتى في أكثر الأمم ثراءً. وبرزت حالات توتر جديدة في العلاقات الدولية نتيجة العقبات التجارية والدعم، وفي التعرفات الجمركية والملكية الأجنبية.

حمل اعتماد مصادر جديدة للطاقة الأولية وتوظيف وسائط تحريك أساسية جديدة تأثيراتٍ عميقةً أيضاً طالت دورات النمو والابتكار التقني. وظهرت حاجة إلى استثمارات كبيرة لتطوير البنى التحتية المنتشرة على نطاق واسع والمطلوبة لاستخراج (أو تسخير) مصادر جديدة للطاقة ولنقل الوقود والكهرباء، فضلاً عن معالجة الوقود وإنتاج وسائط تحريك أساسية جديدة بكميات كبيرة. وبدوره، يوضح إدخال هذه المصادر الجديدة ووسائط التحريك الأولية مجموعات التحسينات التدريجية والابتكارات التقنية الأساسية. وقد أظهرت إفادات شومبيتير Schumpeter أ(1939) التقليدية حول دورات الأعمال في البلدان الغربية التي تسير على طريق التحول الصناعي العلاقة المؤكدة بين مصادر الطاقة الجديدة ووسائط التحريك الأولية من جهة، والاستثمار المتسارع من جهة أخرى (المربع 7-4، الشكل 7-8).

وتعمل حالات تمديد تلك الدورات الطويلة لاحقاً بشكل جيد. إذ ارتبط الازدهار الاقتصادي في أعقاب الحرب باستبدال الهيدروكربونات بالفحم من جهة، وبارتفاع حجم توليد الكهرباء عالمياً (بما في ذلك توليدها بطريقة الانشطار النووي) من جهة أخرى، ناهيك عن امتلاك السيارات من قبل أعداد كبيرة وانتشار دعم الطاقة المخصصة للزراعة. إلا أن هذا الاتساع قابله كبح من جانب أوبك عندما أقدمت المنظمة على رفع أسعار النفط بمقدار خمسة أضعاف عام 1973. واشتملت آخر موجات الابتكارات على طيف متنوع من محولات الطاقة عالية الكفاءة الصناعية والمنزلية وطرح الخلايا الكهروضوئية في الساحة. ولعل ما سيحمل مضامين أعظم في ميدان الطاقة تمثل في الانتشار السريع للرقاقات الدقيقة، والتطورات التي شهدتها الحواسب واستخدام الألياف البصرية على نطاق أكبر، وكذلك إدخال مواد جديدة واستخدام أساليب جديدة في الإنتاج الصناعي، ناهيك عن الأتمتة والروبوتات التي باتت تستخدم في كل مكان.

تنعكس التبعات الاقتصادية للاستخدام الجبار للطاقة حول العالم في قائمة أكبر الشركات حول العالم (فوربس Forbes أ2015). ففي عام 2015، خمس من الشركات العشرين الأولى غير المالية متعددة الجنسيات كانت شركات نفط -إكسون EXXON

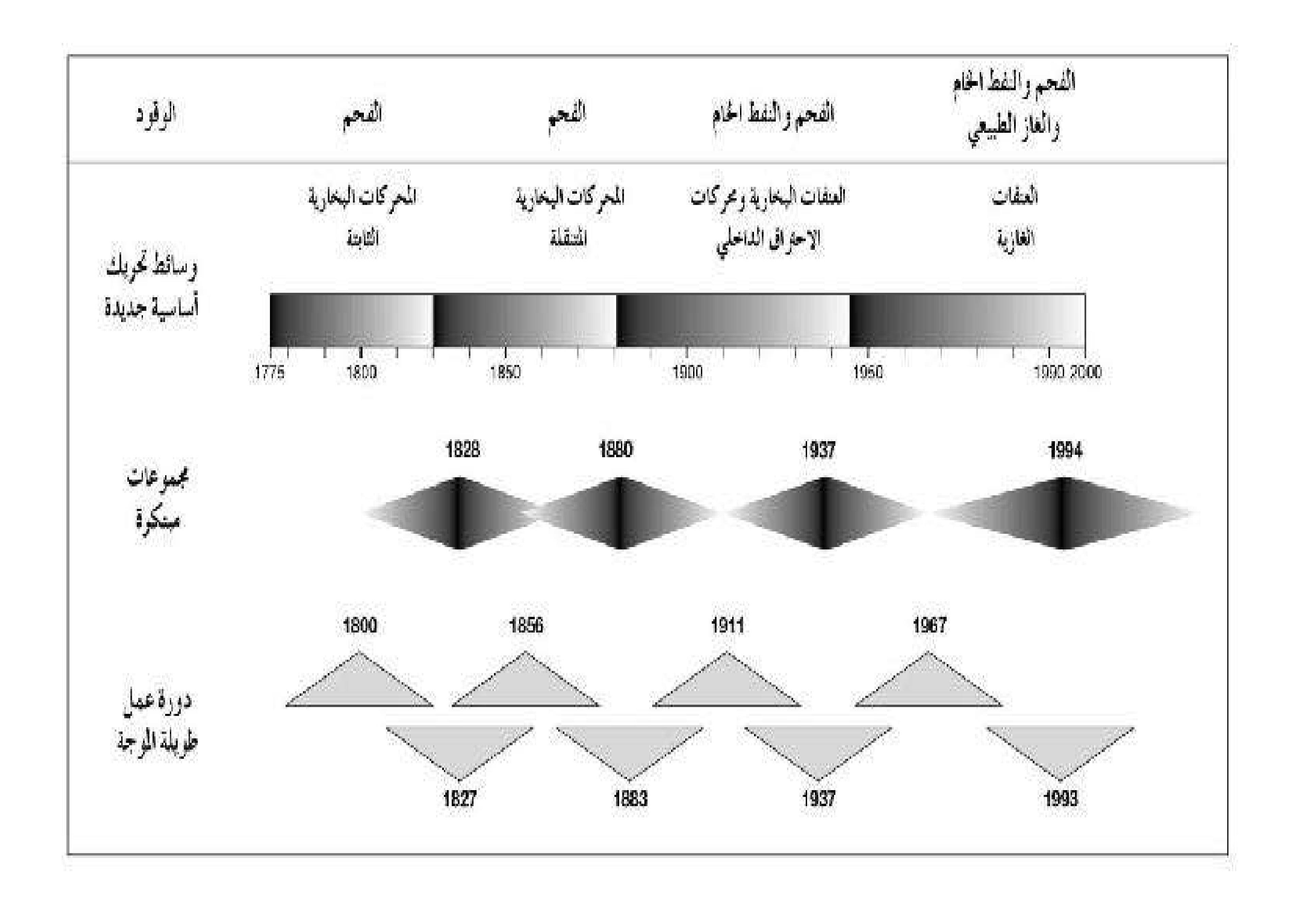
المربع 7-4

دورات العمل والطاقة

تتمثل أولى حالات الازدهار الموثقة جيداً (1787-1814) في انتشار استخراج الفحم وإدخال المحركات البخارية الثابتة لأول مرة. أما موجة الانتشار الثانية (1843-1869) فواضح أنها كانت موجهة بالمحركات البخارية المتنقلة (الخطوط الحديدية والسفن البخارية) والتطورات التي شهدها تعدين الحديد. أما القفزة الثالثة (1898-1924) فقد تأثرت بارتفاع معدل توليد الكهرباء التجارية والاستبدال السريع للمحركات الكهربائية بالمحركات الميكانيكية في إنتاج المصانع. إلا أن النقاط المحورية لتلك القفزات كانت بفاصل نحو 55 سنة. وقد قدمت الأبحاث الباهرة في أعقاب عام 1945 تأكيداً كبيراً على وجود إيقاعات مقدارها نحو خمسين عاماً في الشؤون

البشرية (مارتشيتي Marchetti أ1986) وتؤكد على تكرار مثل تلك الموجات الطويلة في الحياة الاقتصادية والابتكارات التقنية بصفة خاصة (فان دويجن van Duijn أ1983؛ فاسكو Vasko، آيرز Ayers وفونفيلي Fontvieille أ1990؛ آليانز Allianz أ2010؛ بيرنارد Bernard وآخرون 2013).

وتشير تلك الدراسات إلى أن المراحل الأولية لاعتماد أنواع الطاقة الأولية الجديدة وثيقة الارتباط مع بدايات موجات الابتكارات الرئيسة. كما يؤكد تاريخ ابتكارات الطاقة بقوة على الافتراض الذي لا يزال محل جدل والذي يقضي بأن موجات الركود الاقتصادي تعمل كمحفزات للنشاط الابتكاري، حيث تنطبق محاور مجموعات الابتكارات الزمنية الثلاث التي حددها مينش Mensch أ(1979) بشكل شبه تام على بؤرة موجات الانكماش الاقتصادي الذي تحدث عنها شومبيتير Schumpeter. فأولى المجموعات، التي وصلت إلى ذروتها عام 1828، ترتبط بوضوح بانتشار المحركات البخارية الثابتة والمتنقلة، واستبدال الكوك بالفحم النباتي، وكذلك إنتاج الغاز المشتق من الفحم. أما المجموعة الثانية، التي بلغت ذروتها عام 1880 فتشتمل على ابتكارات ثورية لتوليد الكهرباء والإنارة الكهربائية والعنفات البخارية وكذلك الإنتاج الكهرلي للألمنيوم[32]، ومحرك الاحتراق الداخلي. بينما تشتمل المجموعة الثالثة، التي اجتمعت زهاء عام 1937، فتشمل العنفة الغازية والمحرك النفاث والإنارة الفلورية بالإضافة إلى الرادار والطاقة النووية.


الوقود
الفحم
الفحم
الفحم والنفط الخام
الفحم والنفط الخام والغاز الطبيعي
وسائط تحريك أساسية جديدة
المحركات البخارية الثابتة
المحركات البخارية المتنقلة
العنفات البخارية ومحركات الاحتراق الداخلي
العنفات الغازية
1775
1800
1850
1900
1950
1990 2000
مجموعات مبتكرة
1828
1880
1937
1994
دورة عمل طويلة الموجة
1800
1856
1911
1967
1827
1883
1937
1993

الشكل 8-7

مقارنة أزمنة بدء عصور الطاقة (بحسب أنواع الوقود الرئيسة ووسائط التحريك الأولية) مع مجموعات الاختراعات مصنفة بحسب مينش (1979) وبالاعتماد على الموجات الطويلة من دورات التجارة الغربية عند شومبيتر (1939). وقد قمت بالتوسع في كلتا الموجتين حتى عام 2000.

وبترو تشاينا PetroChina ورويال دتش شل Royal Dutch Shell وشيفرون Chevron وساينوبك Sinopec- وثلاث منها كانت شركات لصناعة السيارات: تويوتا Toyota وفولكس فاجن Volkswagen ودايملر Daimler. أما تكثيف الإنتاج فساعده الإمداد الموثوق بالطاقة اليسيرة التكلفة، فقد حفز اقتصادات النطاق وهو ما يتضح في التركيز الصناعي، حيث يعرض كل قطاع من الناحية الافتراضية أمثلة جيدة عن هذه العملية. ففي عام 1900 كان لدى الولايات المتحدة نحو 200 شركة لصناعة السيارات، بينما كان لدى فرنسا ما يزيد على 600 منها (بيرن Byrn أ1900). وفي عام 2000 انخفض العدد إلى ثلاث شركات أمريكية فقط هي جنرال موتورز وفورد وكرايزلر، وشركتين فرنسيتين هما رينو وستروين - بيجو. أما عدد مصانع الجعة البريطانية فقد تراجع من أكثر من 6.000 عام 1900 إلى 142 مصنعاً فقط عام 1980 (مارك Mark أ1985). إلا أن حركة عكسية ظهرت لتطال عدداً من الصناعات (بما في ذلك المصانع الصغيرة للجعة) منذ سبعينيات القرن الفائت، حيث يعزى هذا التغيير بدرجة كبيرة إلى عدد من العوامل منها تحسن مستوى التواصل والتوصيل الأسرع وفرص توريد طلبات خاصة.

وعلى المستوى الشخصي، تمثلت التبعات الأهم لعصر الطاقة العالية في درجة غير مسبوقة من الرخاء وتحسن نوعية الحياة. إذ يعتمد هذا الإنجاز بشكل أساسي على الإمداد الوفير بالأغذية المتنوعة. فالناس في البلدان الغنية يتمتعون بمعدل غذاء للفرد أعلى بأشواط قياساً بأي احتياجات واقعية. أما استمرارية سوء التغذية، وحتى الجوع، وسط هذا الفائض (ففي عام 2015 تلقى نحو 45 مليون أمريكي قسائم إعاشة) فيرجع إلى غياب عدالة التوزيع. أما على المستوى المادي، فقد تمثل الرخاء المتزايد في انخفاض كبير في عدد وفيات الرضع وارتفاع معدلات الأعمار. وعلى المستوى الفكري انعكس في ارتفاع معدلات التعليم والدراسة في المدارس لسنوات أطول مع سهولة أكبر في إمكانية الوصول إلى المعلومات في شتى المجالات.

من العوامل المهمة الأخرى التي أسهمت في هذا الرخاء استخدام الطاقة لتوفير الوقت، لأن استخدامات الطاقة تنطوي على ما هو أكثر من تفضيل سيارات شخصية تستهلك طاقة أكثف ولو أنها أسرع مقابل استخدام وسائط النقل العام. فالتبريد (الذي ألغى الحاجة إلى تسوق الأغذية يومياً) ومجالات الكهرباء والغاز، وأفران المايكروويف، وأجهزة إعداد الطعام (التي بسطت وسرّعت

طهي الطعام وإعادة تسخينه)، والتدفئة المركزية (التي جعلت الحاجة إلى إشعال النار وتلقيمها بالوقود ضرباً من الماضي) كلها تقنيات ممتازة توافر الطعام وهي معتمدة اليوم في جميع بلدان العالم التي تنعم بالرخاء. بالمقابل، يزداد توظيف الوقت الذي يربحه المرء جراء استثمارات الطاقة هذه في القيام برحلات ترفيه وممارسة الهوايات التي غالباً ما تتطلب مزيداً من مدخلات الطاقة.

إلا أن ثمة حقيقة راسخة لم تشهد أي تغيير: فتلك الاتجاهات التاريخية الواضحة والمؤثرة كافة التي تتعقب الزيادة في المصادر الجديدة، وأشكال الأداء المتفوق والمكاسب كافة على مستوى الكفاءة لا تعني أن البشرية تستخدم الطاقة استخداماً عقلانياً دائماً. فقيادة العربات في المدن، التي يفضلها الكثيرون نظراً لسرعتها من الناحية الافتراضية مثال واقعي عن الاستخدام غير العقلاني للطاقة. إذ بعد الأخذ بعين الاعتبار ما تم إنفاقه من وقت لكسب المال اللازم لشراء (أو استئجار) السيارة وتغذيتها بالوقود وصيانتها وتأمينها، نرى أن معدل سرعة تحرك سيارة أمريكية أقل من 8 كم/سا في سبعينيات القرن الماضي (إيليتش Illich أ1974) - ومع الاختناقات المرورية في مطلع العقد الأول من الألفية الثالثة لم تتعد السرعة 5 كم/سا، وهي سرعة تعادل سرعات الحافلات التي تجرها الخيول أو حتى سرعة السير على القدمين. أضف إلى ذلك أنه مع كفاءات الدورة الشاملة للوقود بدءاً من البئر ووصولاً إلى العجلات التي تنخفض عن 10% بأشواط، تبقى السيارات مصدراً رئيساً للتلوث البيئي؛ فضلاً عن أنها تتسبب في عدد كبير من الوفيات والإصابات وفقاً لما ذكرنا آنفاً (منظمة الصحة العالمية 2015ب).

انتشر استخدام الوقود والكهرباء والمحولات الخفيفة والموثوقة التي تتمتع بالمرونة والكفاءة بطريقة مسرفة أيضاً، مسببة في ذلك مشكلات بيئية يترافق مع تحقيقها رضى شخصي عابر (أو ادعاء بذلك على أقل تقدير) كمعاوض إيجابي وحيد. وخلص روز Rose أ(1974، 359) إلى القول إن «كميات كبيرة ومتزايدة من الطاقة لا تزال تستخدم حتى يومنا هذا لتحويل الموارد إلى خردة، حيث نستخلص من نشاطها منافع ومتعة زائلة؛ وسجلنا في هذا الجانب أدنى من المستوى الجيد». إلا أنه لا جديد بخصوص الاستخدامات غير الإنتاجية للطاقة، إذ يمكن اعتبار تلك الاستخدامات مجرد إسراف إن كانت المجتمعات البشرية مدفوعة بحزم من قبل هدف شامل متمثل في الحدّ من استخدام الطاقة المخصصة فقط لأداء مهام أو عمليات ذات صلة مباشرة ببقاء الأنواع.

لكن ما إن بدأت سيطرتنا على العالم المادي تتمخض عن فائض متواضع من الطاقة، حتى بدأت عبقرية البشر بتوظيفها في إيجاد عالم التنوع والفراغ (بالنسبة إلى بعضهم) من صنع الإنسان، رغم إمكانية استخدام مزيد من الطاقة لتأمين الاحتياجات المادية الأساسية. فعمود استنادي يحمل وزناً قد يكون مجرد أسطوانة حجرية بسيطة وناعمة أو موشور متطاول؛ خلافاً للعمارة الإغريقية القديمة ذات الأنماط الثلاثة (الدوري والأيوني والكورنثي) التي لم يكن لها أي داعٍ سواء من الناحية الهيكلية أم الوظيفية. كما لم يكن حفل العشاء الفاخر كافياً، وبالتالي دامت الاحتفالات الرومانية لأيام. ولعل هذا السعي نحو التميز والحداثة والتغيير والتنوع وصل إلى شمولية جديدة (نسبية) في عصر النهضة ومطلع العصر الحديث (1500-1800)، لكن حتى في تلك الفترة كانت جوانب الفخامة التي أظهرها هذان العصران قليلة ومصممة بمعظمها لمصلحة الاستهلاك العام والازدهار.

أضف إلى ذلك أن من السهولة بمكان أن نخلص إلى أن النصب التذكارية في المجتمعات التي سادت ما قبل العصر الحديث لم تكن مجرد مستودعات مهدورة لموارد نادرة. فقد جاء عن نورينزايان Norenzayan أ(2013) أن الاعتقاد بوجود آلهة حاكمة (آلهة قديرة) كان جانباً جوهرياً من جوانب تعزيز التعاون المطلوب في بناء المجتمعات المعقدة والنصب التذكارية واستمراريتها. ونظراً لكونها تعبيرات مادية عن تلك المتعقدات، نراها تسهم في التوافق الاجتماعي وتشجع على الإجلال والاحترام والورع والتأمل والإحسان. على أي حال، فإن نية الذرية غالباً ما تمثلت في الوصول إلى الكمال، وهو ما يشهد عليه عدد الزوار الذين يسافرون كل عام لإبداء إعجابهم بكاتدرائية القديس بطرس في روما أو تاج محل بمدينة آجرا (الشكل 7-9). بالمقابل، ألا تنطبق سمة الإسراف في عمليات تحويل الطاقة بشكل مباشر على البنى الباذخة الملهمة بمعظمها والتي نشيّدها لإدارة المال أو لمراقبة المصارعين الجدد أثناء ركلهم مختلف أنواع الكرات أو رميها أو ضربها؟

والأهم من ذلك أن المجتمعات الحديثة اتخذت خطوات في السعي نحو التنوع وهوايات الترفيه والاستهلاك التفاخري وكذلك التميز من خلال الملكية والتنوع، وصولاً إلى مستويات سخيفة، حيث قامت بذلك على نطاق غير مسبوق. فاليوم هنالك مئات الملايين ممن يتجاوز إنفاقهم السنوي التقديري على مواد كمالية (بما في ذلك نسبة مرتفعة من منتجات الرفاهية) متوسط دخل أسرة غربية كاملة قبل قرن. أما الأمثلة على هذا التبذير فكثيرة. ويشهد حجم الأسر داخل البلدان التي تنعم بالرخاء تناقصاً مستمراً، في حين يتجاوز متوسط مساحة البيوت المصممة تبعاً لرغبة الزبون في الولايات المتحدة 500 $م^2$؛ كما يوجد لدى الجهات المصنعة للسفن قوائم انتظار لصناعة اليخوت المزودة بمهبط لطائرة حوامة؛ أضف إلى ذلك الكثير من السيارات فائقة القوة في السوق اليوم والتي لا يمكن اختبارها كلياً فوق أي من الطرق العامة: إذ تصل استطاعة محرك سيارة Koenigsegg Regera إلى 1.316 ميغا واط، بينما تبلغ استطاعة محرك لامبورغيني وأعلى طرز سيارات مرسيدس - بنز 1.176 ميغا واط «فقط»، حيث تعادل القيمة الأخيرة قرابة 1.600 حصان أو 11 ضعف قوة محرك سيارة صغيرة، كسيارة هوندا سيفيك التي أقودها.

وعلى مستوى أبسط، يتخذ عشرات ملايين الناس وجهتهم عبر القارات



الشكل 7-9

كاتدرائية القديس بطرس التي استكملت عام 1626 أ(Corbis).

بالطائرات نحو شواطئ عامة سنوياً كي يعجلوا بإصابتهم بسرطان الجلد؛ ولدى مجموعة هواة الموسيقى الكلاسيكية المتناقصة ما يزيد على 100 من تسجيلات فيفالدي *Quattro Stagioni* ليختار منها؛ كما أن هنالك ما يربو على 500 نوع من أنواع الحبوب التي تؤكل عند الفطور وما يزيد على 700 طراز من سيارات الركاب. لا شك في أن هذا التنوع الهائل يؤدي إلى سوء تخصيص هائل للطاقة، لكن لا نهاية لذلك على ما يبدو، فالوصول الإلكتروني إلى السلع العالمية التي يمكن للمستهلك الاختيار منها قد ضاعف الخيارات المتاحة أمام الطلبات عبر الإنترنت، والإنتاج المخصص بحسب الطلب لكثير من مواد المستهلك (باستخدام تعديلات فردية عن طريق

تصاميم بالحاسوب والتصنيع باستخدام مواد إضافية) سيرفع تخصيص الطاقة إلى مستوى آخر أعلى من الاستخدام المفرط للطاقة. وهذا ينطبق أيضاً على السرعة: ليبقى السؤال المطروح هل نحن بحاجة فعلاً إلى قطعة من الخردة الزائلة المصنوعة في الصين التي يتم تسليمها في غضون بضع ساعات بعد الطلب لتركب في مكانها على أحد الحواسب؟ أم إلى إيصالها بواسطة الطائرات المسيرة «درون» (الطريقة التي ستطبق عاجلاً)!

لكن بغض النظر عن المؤشرات المستخدمة، تبقى أنماط الإسراف في الاستخدام النهائي للطاقة وأعني الاستخدام المفرط، غير المنتج مقتصرة على قلة من بلدان العالم. فعند النظر إلى معدل إمداد الفرد بالطاقة نرى أن نحو خُمس بلدان العالم المئتين قد تحول إلى مجتمعات صناعية ناضجة تنعم بالرخاء يدعمها استهلاك مرتفع للطاقة (>120 جيغا جول/فرد)، في حين تبقى النسبة أدنى من ذلك عندما يتعلق الأمر بعدد السكان، حيث تبلغ النسبة نحو 18% (1.3 مليار من بين 7.3 مليار عام 2015). أما إضافة الأسر الغنية في بلدان منخفضة ومتوسطة الدخل كالصين والهند وإندونيسيا والبرازيل فيزيد نسبة السكان زيادة هامشية فقط لتصل إلى نحو 20%. فعلى سبيل المثال، لدى الصين اليوم رابع أكبر عدد من الأسر الثرية على مستوى العالم (بعد الولايات المتحدة واليابان والمملكة المتحدة)، لكن مع ذلك يبقى عدد تلك الأسر أقل من خمسة ملايين عام 2015 (آتسمون Atsmon وديكيزت Dixit أ2009؛ وزي Xie وجين Jin أ2015).

وعليه، فإن الانتشار العالمي لأعجوبة الابتكارات التقنية الغربية السريعة أدت إلى انفصال عالمي مقلق بمستوى غير مسبوق لانعدام العدالة الاقتصادية بين الأمم. ففي عام 2015 استأثرت نسبة الشريحة الثرية من البشرية البالغة 10% (الذين يعيشون في 25 بلداً) بنحو 35% من طاقة العالم. ما يعني وفق القيمة الشخصية أن استخدام الفرد للطاقة في أسبوع في الولايات المتحدة يكافئ إجمالي الاستهلاك السنوي من الطاقة الأولية لشخص نيجيري عادي وسنتين من الامداد السنوي بالطاقة لمواطن أوغندي عادي. بالمقابل، يستهلك 5% من الناس (الذين يعيشون في 15 بلداً أفريقياً) نسبة لا تزيد على 0.2% من الإمداد العالمي بالطاقة الأولية المخصصة لأغراض تجارية.

لربما ليس من علاج سهل لحالات التفاوت المذكورة، بينما يتطلب تقليص الفجوة وقتاً، حتى في ظل النمو الاقتصادي بسرعة غير مألوفة، ففي فترة 35 عاماً من حركة التحديث السريعة، من 1980 - 2015، استطاعت الصين زيادة معدل استهلاك الفرد للطاقة فيها ليتجاوز 90 جيغا جول/فرد. وفي هذه العملية، دفع البلد تكاليف جسيمة على المستوى البيئي والصحي، كما تسببت في تأزم التجارة العالمية بالطاقة، إلا أنها تبقى أدنى بنسبة 20-25% من معدل الإمداد المريح. وحتى إن كانت الموارد المطلوبة متاحة مباشرة، تبقى التبعات البيئية لرفع سائر بلدان العالم إلى مستوى استهلاك الغرب للطاقة الأولية غير مقبولة من حيث الأساس. وقد باتت المخاوف الموجودة أصلاً حيال سلامة المحيط الحيوي اعتبارات جوهرية عند التفكر بمستقبل الحضارة عالية الطاقة، حيث تتراوح تلك المخاوف من حفظ التنوع الحيوي إلى تلوث مناخي سريع ناجم عن الأنشطة البشرية.

تأتي الكثير من التطورات التاريخية حصيلة مجموعة نتائج محدودة لاستخدام أنواع معينة من الطاقة بطرائق معينة. أما الاعتماد على أنواع طاقة أولية مختلفة فيترك بصمات واضحة في العمل والفراغ اليومي. فالحياة التي تقضى في تفتيت الكتل الترابية باستخدام المعازق الثقيلة، وزراعة الشتلات التي تقطر ماءً، وإحكام القبضة على سوق النباتات لحشها بالمنجل، وتجميع التبن من أجل الطبخ، وطحن الحبوب يدوياً (وهو ما كان شائعاً في أواخر القرن التاسع عشر في الريف الصيني) تخلق عالماً مختلفاً عن العالم الذي تقوم فيه مجموعات من الخيول القوية بجر محاريث القرص القلاب المقعرة، وتستخدم فيه البذّارات الآلية والحصـادات، عالماً تعطي فيه أيكة حطب كمية كبيرة من الأخشاب اللازمة للمواقد الضخمة، وتستخدم فيه مطاحن بخارية لطحن الدقيق (وهو ما كان شائعاً في أواخر القرن التاسع عشر في الولايات المتحدة).

وبالمثل، حدد الاعتماد علـى وسائط تحريك أساسية مختلفة نطاقاً وإيقاعاً مختلفاً للشؤون اليومية. فتسخير الخيل باستخدام الشكائم والخطامات والرّويسية والكُمُد والقلالات وقشاطات الظهر وسيور الجر وجلجلة الحدوات، والارتجاج الناجم عن رداءة نوابض العربات، وأفواه الحيوانات الغاطسة في أكياس العلائق أثناء راحتها وكنس روث الخيول من شوارع المدينة ونقله لاستخدامه كسماد لتغذية الحدائق في الضواحي نجدها صوراً تستحضر وتيرة حياة مختلفة بشكل كبير مع تلك المحكومة بضغطة زر الإشعال وحفيف الإطارات الشعاعية وركوب سيارات الصالون (السيدان) وسيارات الدفع الرباعي التي تتسم بسلاستها وسرعتها، وشبكات محطات التزود بالوقود، وسهولة توافر الخضراوات والفاكهة التي تنقلها مواكب الشاحنات الثقيلة من كاليفورنيا أو إسبانيا، أو الموضوعة في حاويات مبردة وفي عنابر الشحن داخل طائرات نفاثة من قارات أخرى.

وعليه، كان استخدام الطاقة بوصفه مفهوماً تحليلياً أساسياً للتاريخ البشري خياراً واضحاً ومربحاً ومرغوباً. إلا أنه ينبغي علينا ألا ننظر إليه كعامل تفسيري رئيس. كما يجب عدم المبالغة في القدرة التفسيرية لمقاربة التاريخ من زاوية الطاقة. فالادعاءات التي تتسم بمستوى عالٍ من التعميم تقود إلى استنتاجات لا يمكن الدفاع عنها. فإن أردنا التعميم وقلنا إن ذلك التعقيد الاجتماعي والاقتصادي عبر آلاف السنين يتطلب مزيداً من المدخلات ذات كفاءة عالية وتستخدم قدراً كبيراً من الطاقة لكان ذلك وصفاً لحقيقة لا خلاف حولها. وأن نستنتج بأن كل تحسين في تدفقات الطاقة جلب تحسيناً في الآليات الثقافية، كما فعل فوكس Fox أ(1988) فهو تجاهل لعدد كبير من الدلائل التاريخية المتناقضة.

إن الطريقة الوحيدة المثمرة والكاشفة لتقييم أهمية الطاقة في تاريخ البشرية لا تكمن في الانصياع إلى تفسيرات مبسطة وحتمية يدعمها أداء عدد لا يحصى من أسس الطاقة ولا في تحجيمها بحصرها في دور هامشي قياساً بكثير من العوامل الأخرى التي شكلت التاريخ، سواء أكانت تلك العوامل تغيرات مناخية وأوبئة أم نزوات وعواطف بشرية. أما تحويل الطاقة فيبقى ضرورياً دائماً لتنفيذ أي نشاط، إلا أن أياً من التحولات التي يحدثها الإنسان ويتحكم بها غير تلك المتعلقة بالجسم تبقى تحولات محتومة، وقليل منها فقط يأتي حصيلة الفوضى أو الحوادث. ويعد هذا التقسيم الثنائي

مهماً لتفسير الماضي مثل ما هو مهم لفهم الاحتمالات المستقبلية، فكلاهما محتوم أيضاً، إلا أن نطاقهما يبقى مقيداً بلا شك، في حين تفرض تدفقات الطاقة معظم القيود الأساس.

ضرورات احتياجات الطاقة واستخداماتها

ينعكس الدور الرئيس الذي تلعبه الطاقة في العالم المادي وفي الحفاظ على الحياة بالضرورة على مرآة التطورات النشوئية والتاريخية. فقد اتسم تطور المجتمعات البشرية ما قبل التاريخ وزيادة التعقيد في الحضارات العالية بضرورات طاقة لا حصر لها. وبالطبع، يبقى أكبر القيود المادية الأساسية هو الإشعاع الشمسي الوارد. فهذا التدفق يبقي على درجات حرارة الكوكب ضمن مجال مناسب للحياة القائمة على الكربون ويغذي الدوران في الغلاف الجوي للكوكب بالطاقة وكذلك الدورة المائية. وتعد درجات الحرارة والهطولات وتوافر المغذيات العوامل المحورية المحددة للإنتاجية النباتية، إلا أن جزءاً يسيراً فقط من الكتلة الحيوية المركبة حديثاً قابل للهضم. إذ عملت هذه الحقائق على تشكيل النماذج الوجودية والكثافات السكانية والتعقيدات الاجتماعية الأساسية لدى مجتمعات الصيد كافة والجمع. وفي معظم الحالات توجب على تلك الجماعات أن تكون قارتة[33]. ووجب الحصول على معظم طاقتها الغذائية من جمع كميات وفيرة من البذور (التي تجمع بين النشاء والبروتين والزيوت) والدرنات (الغنية بالنشويات).

وحمل توافر النباتات القابلة للجمع في بؤر محددة وسهولة الوصول إليها أهمية أكبر من أهمية كتلتها الحيوية وتنوعها. فالمراعي الطبيعية والغابات وفرت مكاناً أفضل للعيش قياساً بالغابات الكثيفة. وجلب صيد الثدييات الضخمة (الغنية باللحم والدهن) مستويات مرتفعة من صافي العائدات، بينما أعطى صيد الحيوانات الصغيرة مستوى أدنى من عائدات الطاقة قياساً بجمع النبات. وكانت الشحوم هي المغذيات المرغوبة بالدرجة الأولى والتي عادة ما كانت قليلة إذ أعطت كثافة الطاقة العالية التي وفرتها إحساساً مُرضياً بالشبع، وبالتالي عملت ضرورات الطاقة هذه على رسم استراتيجيات الجمع والصيد وأسهمت في ظهور تعقيدات اجتماعية.

وطالما بقيت العضلات البشرية، ومن بعدها الحيوانية، وسائط التحريك الأولية الوحيدة، نجد أن نسب العمالة كافة قد حُددت وفقاً لضرورات الأيض، أي وفقاً لنسب هضم الأغذية والأعلاف، وتبعاً للاحتياجات الأساسية المتعلقة بالأيض والنمو في الأجسام ثابتة درجة الحرارة، والكفاءة الميكانيكية للعضلات. أما الطاقة البشرية المستمرة التي يوفرها الكبار فلم تتعد 100 واط تقريباً. في حين لم تتجاوز كفاءة تحويل الغذاء إلى طاقة ميكانيكية نسبة 20-25%. ولم يكن من الممكن التغلب على هذه المعوقات إلا من خلال اجتماع الناس وحيوانات الجر، وهو ما أكدت عليه صروح ما قبل التاريخ والقديمة منها، حيث تكرر إنجاز تلك المآثر - التي تطلبت عمليات مراقبة وتنسيق فعالة - من قبل مجتمعات مختلفة كبنائي المنهير (الصخور المنتصبة) في أيرلندا وبريطانيا، والمصريين إبان الأسر الحاكمة الأولى، وكذلك لدى سكان جزيرة إيستر قليلي العدد.

كانت الأعمال العدائية اعتماداً على عضلات الإنسان تتم إما بصراع شخصي أو بهجوم مباغت من مسافة لا تزيد على مئتي متر. وبقي القتل لآلاف السنين يتم على مقربة إلى حد ما. أما بنية التشريح البشري فقد مكنت رامي السهام من تطبيق العزم الأقصى عندما تكون إحدى الذراعين ممدودة والأخرى مثنية بمسافة بينهما أكثر من 70 سم. الأمر الذي يحد من السحب وبالتالي من مدى انطلاق السهم. أما المنجنيقات التي تشدها الكثير من الأيدي فقد عززت من كتلة القذائف، من دون زيادة في مدى الهجوم. ليعقب ذلك معارك وجهاً لوجه في نهاية المطاف تعتمد فيها النتيجة التي يحققها الفرد بدرجة كبيرة على المهارة والخبرة والحظ.

خضع التحول من الصيد والجمع إلى الزراعة إلى مجموعة من العوامل المتعلقة بالطاقة (عوامل تغذوية بالدرجة الأولى) وأخرى اجتماعية، إلا أن تكثيف الزراعة المستوطنة يمكن تفسيره على أنه من الضرورات الواضحة للطاقة (بوسروب Boserup أ1965؛ 1976). وحين تقترب الطريقة المتبعة في إنتاج الغذاء من الحدود المادية لإنتاجيته، يكون بمقدور السكان إما تثبيت أعدادهم (من خلال التحكم بالولادات أو بالهجرة الخارجية) أو باعتماد نظام يوفر إنتاجية أعلى في عملية إنتاج الغذاء. أما بداية الخطوات اللاحقة لتكثيف الإنتاج واستمراريته فقد شهدت تبايناً هائلاً حول العالم، إلا أن كل خطوة نحو التقدم استلزمت مدخلات طاقة أعلى لتسخير المزيد من إمكانات التمثيل الضوئي للموقع. بالمقابل، استطاعت الغلال الوفيرة دعم كثافات سكانية أعلى.

تطلب تكثيف الزراعة أيضاً استثماراً أكبر غير مباشر في الطاقة تمثل في تربية حيوانات الجر وإطعامها، أو في التسويق أو المقايضة أو شراء أدوات ومستلزمات تزداد تعقيداً يوماً بعد يوم، ناهيك عن الاستثمار في مشاريع بنى تحتية طويلة الأجل كإنشاء المدرجات الجبلية وقنوات الري بالإضافة إلى مستجمعات المياه ومستودعات الحبوب والطرقات. وأدى هذا التكثيف بدوره إلى زيادة الاعتماد على مصادر طاقة غير عضلات الإنسان. فحراثة التربة المتراصة إما أن يكون مرهقاً للغاية أو مستحيلاً من دون حيوانات الجر. وبالمثل، كان طحن الحبوب عملاً شاقاً، أوجب الاستعانة بالحيوانات ثم بطاقة المياه والرياح، لطحن المحصول بعد جمعه. واعتمد توصيل الحبوب إلى مسافات طويلة على طاقة الحيوان اعتماداً كبيراً، وأحياناً على طاقة الرياح أيضاً. بينما استهلك تصنيع الأدوات والمستلزمات الحديدية الأمتن والأكفأ الفحمَ النباتي لصهر فلزات الحديد.

شكلت أنواع محددة من ضرورات الطاقة الزراعاتِ التقليديةَ حول العالم. فحيثما غابت الأراضي الواسعة المخصصة للمراعي، أو استوجب استخدام الأراضي كافة المصلحة للزراعة من أجل زراعة الأغذية نجد أن الحاجة إلى الطاقة البشرية هي التي رسمت حدود إنتاج الأعلاف وبالتالي عدد حيوانات الجر الضخمة. وفي الحالات الأخرى كافة (باستثناء القارة الأمريكية وأستراليا) ازداد استخدام حيوانات الجر، إلا أن تغذيتها اقتصرت على رعيها لمخلفات المحاصيل. ومع ارتفاع كمية الحبوب المتوافرة للفرد، بات بالإمكان تخصيص مساحات كافية من الأراضي المصلحة للزراعة لزراعة أعلاف حيوانية جيدة، حيث وصلت مساحة تلك الأراضي في الولايات المتحدة إلى قرابة 25% من كامل الأراضي الزراعية، في الوقت الذي كانت فيه نسبتها في الأراضي المنخفضة المكتظة بالسكان ضمن آسيا أدنى من 5%.

كان لكثافة الزراعة، أي كثافة الطاقة اللازمة لإنتاج الأغذية، تأثيرها أيضاً. وبالكاد كان ثمة مكان لحيوانات الرعي الضخمة في الحقول الزراعية المكثفة والرطبة المخصصة للأرز (على المنحدرات والمدرجات الجبلية) في آسيا، وغالباً ما اقتاتت الجواميس على الأعشاب التي تنمو عند أطراف الحقول أو حتى على النباتات المائية المغمورة. بالمقابل، ترك وجود أعداد كبيرة من الأبقار والخيول وغيرها من الحيوانات الداجنة في المناطق الغنية بالأراضي في أوروبا (وأمريكا الشمالية في القرن التاسع عشر) أثره في كثافة سكان الريف وتنظيم المستوطنات، حيث استوجب تخصيص مساحة كافية للحظائر والاسطبلات وكذلك لتخزين السماد الطبيعي قبل إعادة تدويره لتسميد الحقول.

تمثل النظامان الزراعيان البيئيان اللذان جسدا هذه الحالات المتطرفة في زراعة عديد من المحاصيل التقليدية وعلى رأسها الأرز في يانغتسي جنوب الصين، والزراعة السبيكة في غرب أوروبا، وهي المنطقة التي تعتمد بدرجة كبيرة على الحيوانات لتأمين الغذاء (مشتقات الألبان واللحوم) والجر، كما شكلت ضرورات الطاقة المختلفة الزراعات في العصر ما قبل الكولومبي. وأما الذرة، محصول C4 الذي لا يقارن بغيره، فيتفوق من حيث الغلال على غيره من الحبوب في الأراضي الجافة (القمح والشعير والشيلم والمحاصيل كافة C3) حيث تزداد أهمية هذه الميزة عند زراعة المحصول بين البقوليات: فالذرة والحبوب كانت المحاصيل الزراعية الأساسية في فترة ما قبل العصر الكولومبي في جميع بقاع القارة الأمريكية باستثناء مناطق جبال الأنديز المرتفعة التي سادت فيها زراعة البطاطا والكينوا. أضف إلى ذلك أن غياب الحيوانات الداجنة في القارة الأمريكية وفر مزيداً من الطاقة والوقت الذي استغل لمتابعة نشاطات أخرى.

أما ضرورات الطاقة التي شكلت الأنشطة والبنى غير الزراعية لدى المجتمعات التقليدية فتراوحت بين القيود المرتبطة بالموقع وتحديات الإدارة الفعالة. إذ لم يتح صهر المعادن وتشكيلها على نطاق أوسع إلا باستخدام طاقة المياه، ما قيد وجود الأفران وورشات الحدادة في مناطق جبلية حتى مع إمكانية نقل الفلزات والفحم النباتي بتكلفة زهيدة. وعلى أرض الواقع، حدّت طاقة حيوانات الجر ورداءة الطرقات نطاق حركة نقل المواد المربحة بكميات كبيرة براً؛ في حين كانت الجداول المائية هي المفضلة، ما شجع على بناء القنوات. أما الطرائق التي تفتقر إلى الكفاءة مع استخدام الفحم النباتي (تحويل <20% من طاقة الأخشاب إلى وقود عديم الدخان) فتسببت في إزالة الغابات على نطاق واسع.

كانت إدارة الأراضي والتجارة وكذا المشاريع العسكرية البعيدة مهمة صعبة لا بسبب بطء التنقل فحسب، بل بفعل انعدام الثقة بالسفر براً وبحراً على حدّ سواء. فالإبحار من روما إلى مصر، أكبر منتج لفائض الحبوب إبان الإمبراطورية الرومانية، استغرق فترة من أسبوع وحتى ثلاثة أشهر أو أكثر (دنكان - جونز Duncan-Jones 1990أ). وكثير من حالات إخفاق الأسطول الإسباني في الرسو على الشواطئ الإنجليزية عام 1588 تعزى إلى الرياح، سواء سكونها أم هبوبها بما لا تشتهي سفن ذلك الأسطول (مارتن Martin وباركر Parker 1988أ). ولغاية عام 1800 كان على السفن الإنجليزية الانتظار، لأسابيع أحياناً، كي تأخذها الرياح المطلوبة إلى بليموث ساوند Plymouth Sound (تشاترتون Chatterton 1926أ).

حملت ضرورات الطاقة تأثيراً عميقاً في فرص التحولات الوطنية والإقليمية التي طرأت على الطاقة الحديثة. فالبلدان والمناطق المحلية التي نعمت بالسهولة النسبية لوصولها إلى الوقود الممكن إنتاجه وتوزيعه بتوظيف كمية أقل من الطاقة قياساً بالمصدر الذي ساد سابقاً تمتعت بنمو اقتصادي أسرع، حيث ارتبط الترحيب به بمستوى أعلى من الازدهار وبنوعية حياة أفضل. ومن أول الأمثلة على هذه الميزة على مستوى البلد اعتماد الهولنديين بدرجة كبيرة على الخث الذي ترافق مع العصر الذهبي للجمهورية في القرن السابع عشر. صحيح أن أنجر Unger أ(1984) شكك بتقديرات دي زيو De Zeeuw أ(1978) المتعلقة باستخراج كميات كبيرة من الخث سنوياً، لكن هذا الوقود الأحفوري كان من دون أدنى شك المصدر الأهم للطاقة الأولية في ذلك البلد إبان تلك الفترة. وما هي إلا بضعة أجيال حتى ظهرت فائدة أكبر لهذا النوع، حيث استبدل فحم البيتومين والكوك بالخشب الإنجليزي والفحم النباتي كلياً (كينج King أ2011). وبعد عام 1870 نهض الاقتصادي الأمريكي مستنداً بداية إلى أنواع الفحم الممتازة ثم إلى أنواع الهيدروكربونات ليتفوق بذلك على التجربة الهولندية آنفة الذكر.

ومما لا شك فيه أن الأوضاع اللاحقة لتبوء الجمهورية الهولندية وبريطانيا العظمى والولايات المتحدة مواقع قيادية وإحداثها لتأثيرات دولية ارتبطت ارتباطاً وثيقاً بالاستثمارات المبكرة لأنواع الوقود القابلة للاستخراج إلى جانب الاستثمار في وحدة الطاقة المفيدة بكميات ضئيلة (أي بصافي إيرادات أعلى للطاقة). وقد أوجدت هيمنة الوقود الأحفوري والكهرباء درجة غير مسبوقة من التجانس التقني، فضلاً عن التجانس الاقتصادي والاجتماعي الذي بدأ يشهد اتساعاً تدريجياً (الشكل 7-10). فحتى القائمة الأساسية للبنى التحتية الشاملة للحضارة مرتفعة الطاقة تبقى قائمة طويلة، فهناك مناجم الفحم، وحقول النفط والغاز، ومحطات الطاقة الحرارية، وعمليات التصنيع التي لا حصر لها، ناهيك عن المواد الكيميائية، ومشاريع التصنيع،



الشكل 7-10

صورة لمدينة ساو باولو الكبرى في البرازيل عام 2013. تحتل المدن الضخمة طليعة الأمثلة عن الانسجام الشامل الذي يفرضه استخدام الوقود والكهرباء بمستويات مرتفعة.

والخطوط الحديدية، والطرقات السريعة متعددة المسارات، والمطارات، ومراكز المدن التي تطغى عليها ناطحات السحاب، والضواحي المنتشرة على نطاق واسع.

ونظراً لأنها تؤدي الوظائف عينها، فإن مظهرها المادي الخارجي يجب أن يكون متطابقاً أو حتى متشابهاً إلى حد كبير، كما أن إنشاء وإدارة الكثير من مكوناتها يعود بأصله إلى أعداد صغيرة نسبياً من الشركات التي تمد السوق العالمية بالآلات وأساليب التصنيع والخبرات التي تعتبر جوهرية. أما النتيجتان المقلقتان للاعتماد على تدفقات الطاقة المرتفعة فتتمثلان في محدودية الخيارات (أي استحالة التخلي عن الممارسات الموجودة دونما تغييرات جسيمة وعديدة في

المواقع) وتدهور البيئة. ولعل أفضل تفسير للظاهرة الأولى يكون باستحالة قطع الدعم المقدم للطاقة المرتفعة المستخدمة في الزراعة الحديثة دونما إحداث تحول جذري في المجتمع برمته.

فعلى سبيل المثال، تطلب استبدال حيوانات الجر بالآلات الحقلية الأمريكية الموجودة عدداً من الخيول والبغال لا يقل عن عشرة أضعاف أعدادها القياسية في مطلع القرن العشرين. فضلاً عن الحاجة إلى مساحة نحو 300 مليون هكتار، أو ضعف إجمالي مساحة الأراضي المصلحة للزراعة في الولايات المتحدة، لإطعام تلك الحيوانات، ناهيك عن لزوم مغادرة أعداد كبيرة من سكان المناطق الحضرية المدن باتجاه المزارع. أما البلدان الثرية فليست وحدها التي تعجز عن العودة إلى الزراعة التقليدية من دون تحول كلي وفقاً لما كانت عليه الصورة قبل العصر الصناعي، فنظراً لتطبيق أعلى مستويات كثافة التسميد والري في العالم، نجد أن اعتماد الصين على طاقات الوقود الأحفوري في إنتاج الأغذية أكبر.

إن محدودية الاختيارات تبقى نتيجة متناقضة في عالم محكوم بما أطلق عليه جاك إيلول Jacques Ellul أ(1912-1994) بكل بساطة وشمولية مصطلح «التقنية» (*la technique*) أي «مجمل الطرائق التي تم التوصل إليها بعقلانية واتسمت بكفاءة مطلقة (في مرحلة تطور معينة) في كل ميدان من ميادين الأنشطة البشرية» (إيلول Ellul أ1954، xxv). لربما يقدم هذا العالم لنا منافع غير مسبوقة وحريات سحرية، لكن بالمقابل، على المجتمعات الحديثة ألا تقتصر على التكيف معها فحسب، بل عليها أيضاً الإسهام في أحكامها وقيودها. فكل فرد يعتمد اليوم على تلك التقنيات، لكن لا يوجد من يفهمها بشموليتها؛ فنحن نتبع في حياتنا اليومية ما تمليه علينا.

أما التبعات فتتعدى الطاعة العمياء حيث قضى انتشار طاقة التقنيات على أي دور لعدد كبير من البشر في عمليات التصنيع، ولم تعد هنالك حاجة إلا إلى قدر ضئيل من اليد العاملة (نظراً للاعتماد المتزايد على الحواسيب) لتصميم وإنتاج مواد مخصصة لاستهلاك العامة على مستوى العالم. نتيجة لذلك، نرى أن عدد من تم توظيفهم بشكل عام في بيع منتج ما يزيد على نظرائهم المطلوبين لتصميمه وتحسينه وصناعته. وعند تصنيف الشركات وفقاً لحجم لقوى العاملة فيها نجد أنه في عام 1960 كانت 11 من أصل 15 من كبرى الشركات الأمريكية (وعلى رأسها جنرال موتورز وفورد وجنرال الكتريك والشركة الأمريكية للفولاذ) منتجة للسلع وتوظف ما يزيد على 2.1 مليون عامل؛ لكن بحلول عام 2010 انخفض العدد إلى شركتين صانعتين للسلع هما HP وجنرال موتورز اللتين توظفان نحو 600.000 عامل، وكانتا بين أفضل 15 شركة، حيث نجد الفريق يهيمن عليه اليوم بائعو التجزئة والشركات الخدمية (ولمارت Walmart، يو بي إس UPS وماكدونالدز McDonald’s، ويم Yum، وتارجت Target).

أما الخطوة المنطقية التالية فتكمن في رؤية هذه الحقيقة بوصفها جزءاً من العملية المؤدية إلى الاستبدال النهائي للآلات بالحياة القائمة على الكربون (ويسلي 1974). إن المسارات المتوازية بين الكيانين تبعث على الحيرة. فالآلات حية من الناحية الديناميكية - الحرارية، وانتشارها يتوافق والانتقاء الطبيعي، أي إن الآلات الفاشلة لا تنتج ثانية، بل تفسح المجال أمام أنواع جديدة لتحل محلها، وتميل نحو الكتلة القابلة للدعم بأقصى درجة؛ كما أن الأجيال اللاحقة باتت أكفأ أيضاً

(تذكروا تلك النسب الأدنى المتعلقة بالكتلة/الاستطاعة المثيرة للعجب!) وأكثر حركة، وأطول عمراً. لعلنا نستبعد حالات التوازي هذه على أنها مجرد تشخيصات (تشبيهات بالأحياء)، إلا أن صعود الآلات كان حقيقة لا يمكن إنكارها.

فالآلات حلت بالفعل محل مجالات هائلة من النظم البيئية الطبيعية بالتزامن مع توافر البنى التحتية المطلوبة لصناعتها ونقلها وتخزينها (مناجم وخطوط حديدية وطرقات ومصانع ومرائب سيارات)، كما ازداد الوقت الذي ينفقه الإنسان على خدمتها، وتسببت مخلفات إنتاجها في تدهور واسع للتربة والمياه والهواء؛ في حين كانت كتلة السيارات عالمياً أعلى من كتلة البشر أجمعين. أما محدودية موارد الوقود الأحفوري فقد تلعب دوراً هامشياً فقط في إيقاف صعود الآلات. وعلى المدى القريب، يمكن تعديل تلك الآلات على نحو يرفع من كفاءتها؛ لكنها على المدى البعيد قد تعتمد على تدفقات الطاقة المتجددة.

في الأحوال كافة، يمكن لسوء تفسير الدليل الجيولوجي الواضح أن يرى في ارتفاع استخدام أنواع الوقود الأحفوري مدعاة للقلق حيال نضوبها المبكر. فاحتياطي الوقود الأحفوري جزء من قاعدة الموارد التي يعرف توزعها المكاني وتكاليف استخراجها (وفقاً للأسعار الراهنة ومع توافر التقنيات الموجودة) بدرجة كافية من التفصيل تبرر استثمارها تجارياً. فمع استعادة مقادير أعلى من الموارد المتاحة أصلاً، يبقى الإجراء الأفضل لقياس توافرها هو كلفة إنتاج وحدة هامشية لمعدن ما، حيث يأخذ هذا النهج بعين الاعتبار التطورات التي تشهدها تقنيات استثماراتنا وقدرتنا على دفع تكاليف استخراجها. ولعل الارتفاع الكبير في تكاليف استخراج النفط الخام في أعقاب عام 2005 من رواسب الصخور الزيتية الوفيرة في أمريكا -اعتماداً على الجمع بين الحفارات الأفقية والتكسير الهيدروليكي (سميل 2015أ) وهو ما أعاد البلد ثانية إلى مرتبة أكبر منتج للنفط والغاز- يوضح الفرص الهائلة التي تنتظر من يفتح باب استثمارها كلياً.

وعليه، فإن استنزاف الموارد ليس بمسألة استنزاف مادي فعلي، بل هو عبء زيادات التكاليف التي لا سبيل إلى دعمها في آخر المطاف. وإلى جانب بعض الاستثناءات الملحوظة (كسرعة توقف هولندا عن استخراج الفحم عقب اكتشاف حقل جرونينجن للغاز الطبيعي الفائق الضخامة)، فإنه لا توجد نهايات مفاجئة، بل مجرد تراجع في الاستنزاف على المدى البعيد، وتوقف بطيء، مع تحولات تدريجية نحو مستويات إمداد جديدة (لعل استخراج الفحم البريطاني يمثل التوضيح الأمثل لهذه العملية). ويعد هذا الفهم جوهرياً في عملية تقييم ارتفاع التوقعات حيال الحضارة القائمة على الوقود الأحفوري، فمحدودية موارد الوقود الأحفوري لا تنطوي على أي تواريخ محددة للاستنزاف المادي للفحم أو الهيدروكربونات، ولا يقصد بها بداية مبكرة لارتفاع لا يمكن تحمله في التكاليف الحقيقية لاستخراج تلك الموارد وبالتالي ضرورة الانتقال سريعاً نحو عصر ما بعد الوقود الأحفوري.

إن مسألة تقدير الاحتياطي وتقييم الموارد ليست بكافية لتوقع مستقبل الوقود الأحفوري. فالطلب العالمي عليه وكفاءة استخدامه لا تقل أهمية عنها، فقد يشهد الطلب (الذي يخضع إلى النمو الاقتصادي والزيادة السكانية) زيادة مرتقبة، مع أن من الممكن تعديلها تعديلاً كبيراً، مع استمرارية إمكانية تحسين كفاءات تحويل الطاقة حتى بعد أجيال من التطوير. وبالتالي، ليس ثمة ما يقلق حيال

الاستنزاف المبكر للوقود الأحفوري -الذي يعبر عنه مناصرو فكرة وصول استخدام النفط إلى ذروته (ديفيس Deffeyes أ2001)- بل تأثير هذا الاستخدام في إمكانية العيش ضمن المحيط الحيوي (وفوق ذلك كله العيش وسط ظروف تغير المناخ العالمي) التي تشكل مصدر القلق الأهم على المدى القريب والبعيد والناجم عن اعتماد العالم على الفحم والمواد الهيدروكربوناتية.

أهمية التحكم

لم يكن لتبني مصادر الطاقة الجديدة سابقاً ووسائط التحريك الأولية الجديدة نتائج بعيدة الأثر لولا إدخال وإتقان نماذج جديدة لتسخير أنواع الطاقة تلك والتحكم بتحويلها إلى خدمات الطاقة المطلوبة (تدفئة وإنارة وحركة) بالمعدلات المرغوبة. ويمكن لعمليات التحكم أو التفعيل هذه أن تفتح بوابات كانت مغلقة فيما سبق فتحرر تدفقات جديدة للطاقة - أو تزيد إجمالي نسب العمل للعمليات المحددة من قبل، أو تجعلها أوثق أو أكفأ. وقد تكون أجهزة ميكانيكية بسيطة (مثل النواعير) وكذلك ترتيبات معقدة تتطلب هي أيضاً مدخلات طاقة كبيرة، فالمعالِجات الدقيقة في السيارات الحديثة مثال ممتاز عن هذه الفئة. أو قد تكون مجموعات أفضل من الإجراءات الإدارية، وأسواق حددت أو طورت حديثاً، أو قرارات سياسية أو اقتصادية جوهرية.

وبغض النظر عن مدى قوته وقدرته، يتحول الحصان إلى واسطة نقل أولية خاضع للتحكم بفعالية بمجرد إدخال الشكيمة في فمه وربطه بالرسن الذي يبقى في قبضة سائسه؛ فبوسعه جر عربة حربية باستخدام سرج خفيف جيد النوعية وحسب؛ كما يمكن استخدامه في معركة مسلحة عند سرجه وتجهيزه بالركاب؛ فضلاً عن إمكانية توظيفه في جر أحمال ثقيلة عند تزويد الخيل بنعل مناسب وتسخيره بكفل مريح على رقبته؛ أو قد يكون واحداً من مجموعة خيل عالية الكفاءة عندما تتم معادلة السحب غير المتساوي لحيوانات مختلفة الأحجام باستخدام عارضة التوازن.

لا شك في أن غياب التحكم المناسب قد يعيب أداء وسائط التحريك الأولية المثير للإعجاب. إلا أن وصول العلاج كان بطيئاً جداً في بعض الأحيان. ولعل أفضل توضيح لهذا الإخفاق يكمن في عدم القدرة على تحديد خطوط الطول. فمع بداية القرن الثامن عشر، كانت السفن الشراعية المجهزة بالكامل محولات عالية الكفاءة لطاقة الرياح وأدوات قوية لبناء الإمبراطورية لدى أوروبا، لكن مع ذلك لم يستطع ربابنتها تحديد أماكن خطوط الطول. وجاء في ملخص عريضة قدمه ربابنة وتجار إنجليز إلى البرلمان عام 1714، أن سفناً كثيرة تأخرت وأخرى فقدت. ونظراً لأن سرعة دوران الأرض تبلغ نحو 460 م/ثا عند خط الاستواء، فإن إيجاد خط الطول يتطلب موقتات (كرونومترات) لا تضيع أكثر من جزء من الثانية في الأسبوع إن كان للسفينة أن تحدد موقعاً بمعدل خطأ أقل من كيلومترين بعد رحلة من شهرين إلى ثلاثة أشهر. وفي عام 1714 صدرت لائحة عن البرلمان البريطاني تمنح مبلغاً وصل إلى 20.000 جنيه لمن ينجح بهذا الإنجاز، وبالفعل استطاع جون هاريسون John Harrison أ(1693-1776) الفوز به في نهاية المطاف عام 1773 (سوبيل Sobel أ1995).

أما فيما يخص الوقود فنرى أنه لو لم يستخدم الفحم كبديل عن الخشب في المواقد المفتوحة، أو لو إن النفط الخام ظل في نطاق كيروسين الإنارة لاتخذ التاريخ مساراً مختلفاً. إلا أن الوصول إلى مصادر طاقة وفيرة أو إلى وسائط تحريك أساسية معينة لم يكن في معظم الحالات هو ما حقق الفرق على المدى الطويل، إذ تمثلت العوامل الحاسمة نوعاً ما في السعي نحو الابتكار والالتزام بنشر الموارد، وتوظيف التقنيات الجديدة بإتقان، وإيجاد استخدامات جديدة لها. كما حددت تلك العوامل مجتمعة كفاءات الطاقة لكامل الاقتصادات أو لعمليات معينة، فضلاً عن تحديدها لسلامة تقنيات التحويل الجديدة وتقبلها. صحيح أن الأمثلة عن ذلك تبقى صادمة أحياناً، إلا أنه غالباً ما يمكن إيجاد الإسهامات الذكية في عصور الطاقة كافة ولأنواع الوقود ووسائط التحريك الأولية كافة.

ومن الناحية التقنية الضيقة نرى أن أهم فئات التحكم قد اشتملت على أجهزة إعطاء البيانات الراجعة ونظمها (دويل Doyle وفرانسيس Francis وتانينباوم Tannenbaum أ1990؛ آستروم Åström وموراي Murray أ2009) إذ تقوم تلك الأجهزة والنظم بإرجاع المعلومات المتعلقة بعملية معينة إلى آلية التحكم، ما يمكّن إمكانية تعديل العملية بناءً على تلك المعلومات. وقد استطاعت أوروبا في مطلع العصر الحديث أن تتبوأ مركزاً قيادياً حاسماً في تطوير تلك البيانات الراجعة، حيث كان من بين بواكير تطبيقاتها المنظم الحراري (الذي أدخل لأول مرة قرابة عام 1620 من قبل مهندس هولندي يدعى كورنيلز دريبل Cornelis Drebbel)، والتعديل التلقائي لطواحين الهواء باستخدام الذيول مروحية الشكل (التي تعود براءة اختراعها عام 1745 إلى حداد إنجليزي يدعى إدموند لي Edmund Lee)، وعوامات الخزانات المنزلية والمراجل البخارية (1746-1758) والمنظم بالطرد المركزي الشهير لجيمس واط الذي ينظم طاقة المحركات البخارية (1789). أما المثال الرائج فهو فئة المعالجات الدقيقة هذه التي تتحكم بتشغيل محركات السيارات والمحركات النفاثة.

وتشمل فئة أجهزة التحكم التي لا يمكن الاستغناء عنها التعليمات التي تتيح مضاعفة عمليات الإنتاج والإدارة وإنتاج سلع وخدمات قياسية. ولعل تطور الطباعة السريع الذي شهدته أوروبا في مطلع العصر الحديث كان له عظيم الأثر في هذا الخصوص. ففي عام 1500 نُشر ما يربو على 40.000 كتاب أو إصدار في أوروبا الغربية بأكثر من 15 مليون نسخة (جونسون 1973). وكان إدخال النقش المفصل على النحاس في القرن السادس عشر وما تزامن معه من تطورات على مستوى إسقاط بيانات مختلفة على الخرائط من بواكير التطورات الملحوظة أيضاً. ومن بين الابتكارات البارزة الأخرى في هذا المضمار كان جهاز البطاقات المثقبة من اختراع جوزيف ماري جاكار Joseph Marie Jacquard أ(1752-1834) عام 1801 لضبط عمليات الحياكة بالنول. وقبل عام 1900، أدخلت هذه البطاقات المثقبة إلى الخدمة في آلات هيرمان هوليريث Herman Hollerith أ(1860-1929) المستخدمة في معالجة البيانات الإحصائية (لوبار Lubar أ1992). وبعد عام 1940، عملت المدخلات المثقبة على ضبط أول حواسب كهربائية ميكانيكية ومن ثم الحواسب الإلكترونية، التي أزاحها جميعاً اليوم التخزين الإلكتروني للبيانات.

بقيت أدوات التحكم الجديدة آلية بمعظمها حتى نهاية القرن التاسع عشر. أما في القرن العشرين، فعملت الرياضيات والفيزياء التطبيقية، وعلى رأسها ظهور وانتشار تطبيقات الترانزستور والدارات المتكاملة والمعالجات الدقيقة على إيجاد مجال جديد واسع للتحكم الآلي المتزايد التعقيد باستخدام أجهزة كهربائية وإلكترونية. وتراوحت الابتكارات الجوهرية من انتشار الرادار على نطاق واسع (للتحكم بإطلاق النار والقصف وتوجيه الصواريخ والملاحة باستخدام الطيار الآلي) إلى عدد لا يحصى من أجهزة التحكم القائمة على الرقاقات الدقيقة المستخدمة في الحواسب والأجهزة الإلكترونية سواء الخاصة بالمستهلك أو العمليات الصناعية.

وعلى نطاق أوسع، تبقى أكثر الاعتبارات الأساسية على مستوى التحكم متمثلة بالتأكيد بما تفعله المجتمعات بمصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية لديها. فما هي الطريقة التي تقوم وفقها تلك المجتمعات بتوزيع تلك المصادر بين الاستخدامات الإنتاجية والاستهلاك الشخصي التقديري؟ ما هو التوازن، إن وجد، الذي ترجو تلك المجتمعات التوصل إليه وسط نقاط الجذب المتناقضة بين الاكتفاء الذاتي والاعتماد الواسع على التجارة الخارجية؟ ما مدى الانفتاح الذي ترغب به تلك المجتمعات أمام السلع والأفكار؟ ما هو السعر الذي ستدفعه من أجل الإنفاق العسكري؟ وما مدى التحكم المركزي الذي ترغب في تطبيقه؟ لقد كانت المعوقات والدوافع والميول الثقافية والدينية والإيديولوجية والسياسية عوامل حاسمة في الميادين كافة المذكورة. مرة أخرى يمكن اختيار أمثلة عديدة من عصور الطاقة كافة. وفي هذا المقام نجد مفارقتين جسيمتين توضيحيتين، الأولى بين الرحلات البحرية الاستكشافية الغربية والصينية والأخرى بين النُهج الروسية واليابانية المتعلقة بالتحديث الاقتصادي.

لم تكن الرحلات عبر المحيط تتطلب أشرعة تمكن السفينة من الإفادة من الرياح بصورة أكبر فحسب، بل احتاجت أيضاً إلى هياكل أقوى ودفات توجيه خلفية جيدة، وأجهزة ملاحة موثوقة. ويعود معظم هذه التطورات بأصلها إلى الصينيين الذين جمعوها في أساطيلهم المعروفة بأساطيل مينج. وبعد قرن من عودة ماركو بولو من الصين، نفذت تلك الأساطيل اختراقات نحو غرب الصين إلى مسافات أبعد ما قامت به أي سفينة أوروبية باتجاه الشرق في تلك الآونة. وبين عامي 1405 و1433 أبحرت بشكل متكرر في مياه جنوب شرق آسيا والمحيط الهندي لتزور ساحل شرق أفريقيا (نيدهام Needham وآخرون). إلا أن التدهور المفاجئ الذي أصاب الإمبراطورية الخاضعة لحكم مركزي جعل القيام بمزيد من الرحلات البحرية مستحيلاً.

بالمقابل، بدأت السفن الأوروبية في أواخر العصور الوسطى بتشغيل وسائط تحريك أساسية عرفت بتدني مستواها قياساً بغيرها، إلا أن ما دعم هذا المشروع كان اجتماع المواقف الفضولية والعدوانية والحماسية للحكام والملاحين الإسبان والبرتغاليين. وفي القرن السابع عشر برزت المشاريع التجارية الإنجليزية والهولندية، حين تأسست شركة الهند الشرقية في لندن عام 1600؛ واعتمدت شركة الهند الشرقية الهولندية (Vereenigde Oost-Indische Compagnie) عام 1602 (كياي Keay أ2010؛ جاسترا Gaastra أ2007). وبين عامي 1602 و1796 قامت سفن شركة الهند الشرقية الهولندية بنحو 4.800 رحلة إلى الهند الشرقية، حيث حكمت شركة الهند الشرقية أجزاء واسعة من شبه القارة بين عامي 1757 و1858،

لتتمخض هذه الطموحات الاقتصادية والدينية والسياسية عن سيطرة أوروبية في نهاية المطاف على البحار وتأسيس إمبراطوريات مترامية الأطراف.

إن مقارنة بين الثروات الاقتصادية لروسيا واليابان ما بعد عام 1945 توضح المفارقات بين الكم والنوع، وبين الاكتفاء الذاتي مقابل التجارة، ودور الدولة كحاكم مطلق مقابل دورها كمحفز رائد للتحديث. فموارد الفحم الثانوية والقدرة الكهرومائية المحدودة وغياب المواد الهيدروكربوناتية افتراضياً في اليابان أجبر البلد على أن يكون مستورداً رئيساً للطاقة، وللتخفيف من سرعة تأثره أمام ارتفاع أسعار الوقود وحالات توقف الاستيراد بات واحداً من أكثر مستخدمي الطاقة كفاءة على مستوى العالم (ناجاتا Nagata أ2014). وقد عملت البيروقراطية الحاكمة في اليابان على تحفيز تعاون الدولة مع الصناعات والابتكارات التقنية والصادرات ذات القيمة المضافة.

بالمقابل، وبفضل إرث المعادن الذي لم يكف عن الإثراء يوماً بعد يوم في روسيا الأوروبية وسيبيريا وآسيا الوسطى، لم يتحول الاتحاد السوفييتي إلى مكتف ذاتياً فيما يخص أشكال الطاقة كافة فحسب، بل بات مُصدّراً رئيساً للوقود. إلا أن أجيالاً من التخطيط المركزي الصارم، والخطط الخمسية الستالينية ذات الحكم المطلق التي استمرت لفترة طويلة بعد موت الديكتاتور، والعسكرة المفرطة للاقتصاد جعل من ذلك البلد المستخدم الأقل كفاءة للطاقة في العالم المتحول نحو الصناعة. ففي السنوات التي سبقت انهيار الاتحاد السوفييتي كان أكبر منتج للنفط الخام على مستوى العالم (حيث استخرج 1.66 ضعف ما استخرجته العربية السعودية) وكذلك الغاز الطبيعي (نحو 1.5 ضعف ما استخرجته الولايات المتحدة)، إلا أن إجمالي الناتج المحلي للفرد كان مجرد 10% من الإجمالي في الولايات المتحدة (كوشنيرز Kushnirs أ2015).

بقي التحكم الرئيس في تدفقات الطاقة الحرجة بعيداً عن تأثير الإنسان في أغلب الأحيان تارة، أو نراه قد سُلب أو تأثر بدرجة كبيرة بالتحولات الطفيلية تارة أخرى. وقد رسم مكنيل (1980) مفهوماً لتلك الأفكار في معالجته المزدوجة للطفيليات الصغرى والطفيليات الكبرى. فالطفيليات الصغرى كالبكتيريا والفطور والحشرات تتحكم في جهود الإنسان لتأمين طاقة كافية من الغذاء. إذ تضر أو تدمر المحاصيل والحيوانات الداجنة أو تمنع الاستفادة من العناصر الغذائية المهضومة بشكل فعال من خلال غزوها المباشر لجسم الإنسان، في حين كان على المجتمعات الحديثة تخصيص كم كبير من الطاقة للحدّ من تفشيها في الحقول وبين السكان، واتباع إجراءات عديدة على رأسها اللجوء إلى استخدام مبيدات الآفات والمضادات الحيوية.

أما الطفيليات الكبرى فارتبطت بعدد من أنواع التحكم الاجتماعي في تدفقات الطاقة معتمدة بذلك على القسر - الذي تراوح بين العبودية وأعمال السخرة حتى الاستعمار العسكري - وكذلك على العلاقات المعقدة (الطوعية جزئياً) بين مجموعات غير متساوية من الناس. وقد باتت مجموعات المصالح الخاصة الطفيليات الكبرى الأهم بالتأكيد في البلدان الحديثة المعروفة بثرائها إذ تتراوح من جمعيات احترافية ونقابات عمال متفرقة مقيدة الوصول إلى منتجات صناعية محتكرة وكذلك إلى جماعات الضغط. فمن خلال تثبيت الأسعار وصياغة السياسات الحكومية أو نقضها في الغالب أو حتى تعطيلها، تعمل تلك الطفيليات عكس الاستخدام الأمثل للموارد كافة، كما تحمل تأثيراً ملحوظاً وحتمياً في تطور مصادر الطاقة وكفاءة استخدامها. ناهيك عن أنها كانت وراء الدعم

الكبير الذي بقي لعقود يصب لدى منتجي شتى أنواع الوقود الأحفوري والكهرباء النووية، أما اليوم فتقف تلك المجموعات وراء أنواع الدعم الجديدة التي تشجع على تركيب خلايا كهرضوئية وعنفات هوائية (انظر المربع 7-3).

وُفق أولسون Olson أ(1982) عندما أطلق على تلك التكتلات اسم التحالفات التوزيعية مشيراً إلى أن المجتمعات المستقرة تكتسب تدريجياً عدداً أكبر من هؤلاء الحلفاء. ويساعد تقبل هذه المناقشة الجدلية على تفسير التراجع الصناعي البريطاني والأمريكي، وكذلك نجاح ألمانيا واليابان ما بعد الحرب العالمية الثانية. فقد كانت المنظمات التي أوجدتها القوى المنتصرة عقب عام 1945 في هذين البلدين الخاسرين أكثر شمولية، حيث كان أداؤها المتعلق بالطاقة يدعم هذه الرؤية: فاقتصاد اليابان وألمانيا أقل كثافة في استخدام الطاقة بشكل واضح قياساً بنظيريه البريطاني والأمريكي. وهذا لا ينطبق على المجمل فحسب، بل ينطبق عملياً على كل مقارنة بين القطاعات الرئيسة.

من ناحية أخرى، فتحت أعمال بعض الفرق الخاصة بوابات جديدة للطاقة وحسنت كفاءة تحويلها. فمهارات المهاجرين البريطانيين في القرن التاسع عشر كانت أعلى قياساً بمستوياتها لدى المهاجرين المحليين. وكان واضحاً أن تدفقهم إلى الولايات المتحدة شكل حافزاً مهماً نحو ارتفاع تدفق الطاقة (آدامز Adams أ1982)، لكن في الوقت عينه كان حافزا لتوفير الطاقة بشكل ملحوظ في نهاية المطاف. وظهرت عملية مماثلة منذ تسعينيات القرن الفائت مع الهجرة الكبيرة للمهندسين الهنود نحو شركات إلكترونية وشركات إنترنت بصفة عامة وإلى وادي السيليكون بصفة خاصة (بابات Bapat أ2012). وتسعى الشركات متعددة الجنسية، التي أجبرت على التنافس عالمياً، جاهدة لخفض كثافة استخدام الطاقة في منتجاتها، ونشر تقنيات جديدة مع تعزيز كفاءات تحويل الطاقة بمستويات أعلى حول العالم.

حدود تفسيرات الطاقة

لم يكن لدى جل المؤرخين أي استخدام للطاقة كمتغير تفسيري أساسي. حتى فرديناند براودل (1902-1985)، المعروف بإصراره على أهمية العالم المادي والعوامل الاقتصادية، لم يأت على ذكر أي شكل من أشكال الطاقة في تعريفه المسهب للحضارة:

> الحضارة قبل كل شيء هي مكان، «منطقة ثقافية» أو «موقع» بحسبما يطلق عليه عالم الأجناس. فضمن هذا الموقع... عليك أن تصور تنوعاً هائلاً «للسلع» وللخصائص الثقافية، التي تمتد من شكل البيوت فيها، والمادة المبنية منها، وأسقفها، إلى المهارات كالأسهم المزودة بالريش، ولهجتها أو مجموعة لهجاتها، ومذاق طبخها، إلى التقنية المعينة، وبنية معتقداتها، وصولاً إلى البوصلة والورق والمطابع. (براودل Braudel أ1982، 202)

وكأن المواد والخيول والسهام والمطابع ظهرت من لا شيء، من دون أي تكاليف للطاقة! لا يمكن الدفاع عن هذا الإقصاء إذا أردنا فهم العوامل كافة أساس المشكلة للتاريخ - لكن إذا ما لاحظ المرء أن أنواع مصادر الطاقة ووسائط التحريك الأولية ومستويات استخدام الطاقة لا تحدد طموحات المجتمعات البشرية وإنجازاتها فإن لملحوظته ما يبررها. وثمة أسباب طبيعية لا سبيل إلى إنكارها بخصوص هذه الحقيقة. بالطبع، تعد تحولات الطاقة أساساً بالمطلق لبقاء الكائنات الحية كافة وتطورها - إلا أن تعديلها واستخدامها التفاضلي يبقى محكوماً بالخصائص المتأصلة بالكائنات الحية.

والطاقة المتأصلة، شأنها شأن قوانين الديناميكا الحرارية، ليست العامل الوحيد المحدد للتطور في المحيط الحيوي، أو الحياة بصورة عامة والأنشطة البشرية بصورة خاصة. فالتطور ينبع من الداخل حتماً، إلا أن ثمة مدخلات أخرى لا يمكن استبدالها أو تدويرها. فالأرض المغمورة بالإشعاع لم تكن لتستضيف الحياة القائمة على الكربون لولا توافر ما يكفي من العناصر التي لا يمكن الاستغناء عنها للقيام بالتحولات الكيميائية الحيوية، بما في ذلك الفوسفور في ثلاثي فوسفات الأدينوزين، أو النيتروجين والكبريت في البروتين، أو الكوبالت والموليبدينوم في الأنزيمات، أو السيليكون في سوق النباتات، أو الكالسيوم في أصداف الحيوانات وعظامها. أما المعلومات المتعلقة بالتكاثر فتوجه الطاقة نحو الصون والنمو والتمايز والتكاثر؛ ولعل هذه التحولات غير المعكوسة تبدد المادة والطاقة على حد سواء، وتتأثر بتوافر الأرض والمياه والمغذيات، وكذلك بالحاجة إلى التأقلم مع التنافس والافتراس السائد بين الأنواع.

إن تدفقات الطاقة تحدّ تنظيم المحيط الحيوي عند أي نطاق من دون أن تحدده. فقد جاء عن بروكس Brooks وويلي Wiley أ(1986، 37-38):

> إن تدفقات الطاقة لا تقدم تفسيراً لسبب وجود المتعضيات (الكائنات الحية)، أو اختلافها، أو اختلاف أنواعها... فالخصائص الداخلية للمتعضية هي ما يحدد كيفية تدفق الطاقة، وليس العكس. فإذا كان تدفق الطاقة حتمياً بالنسبة للنظم الحيوية، صار من المستحيل لأي كائن حي الجوع حتى الموت... ونقترح بأن المتعضيات هي أجهزة مادية ذات خصائص فردية محددة وراثياً (أو بتأثيرات غير وراثية في المورثات)، تستخدم الطاقة المتدفقة من خلال البيئة بطريقة عشوائية نسبياً.

إلا أن هذه الحقائق الجوهرية لا تبرر تجاهل دور الطاقة عبر التاريخ؛ بل تجادل لمصلحة تأهيلها وإدخالها في التاريخ بالشكل المناسب. ففي المجتمعات الحديثة والمعقدة يبقى استخدام الطاقة أقرب إلى كونه مسألة رغبات وعروض بدلاً من كونه مجرد احتياجات مادية. أما كمية الطاقة الخاضعة لإدارة المجتمع فتضع حدوداً واضحة على إجمالي نطاق العمل، لكنها قد لا تخبرنا شيئاً عن الإنجازات الاقتصادية الأساسية للفريق أو أخلاقياته. وتندرج أنواع الوقود ووسائط التحريك الأولية السائدة بين أهم العوامل المشكلة لمجتمع ما، إلا أنها لا تحدد تفاصيل نجاحاته أو إخفاقاته. وهذا ما يتضح بصفة خاصة عند دراسة المرء لمعادلة الطاقة-الحضارة. إذ يعادل هذا المفهوم،

المنتشر جداً في المجتمع الحديث، الاستخدام المرتفع للطاقة مع المستوى العالي للحضارة: فما علينا إلا أن نستذكر عمل أو توالد أو استنتاج فوكس بأن «تحسين الآليات الثقافية حدث مع كل تحسين ارتبط بتدفق الطاقة» (فوكس 1988، 166).

إن أصالة هذه الرابطة لا تثير الدهشة. فزيادة استهلاك الطاقات الأحفورية فقط هو الذي كان قادراً على تلبية كثير من الرغبات المادية على هذا النطاق الواسع. كما تساوت المستويات الأعلى من الحيازة والراحة مع التطورات الحضارية. إلا أن هذا النهج المنحاز يستبعد العالم الكامل للإنجازات الإبداعية - الأخلاقية والفكرية والجمالية - التي لا ارتباط واضحاً لها بالمستويات المعينة لاستخدام الطاقة أو نماذجها، إذ لم يوجد ارتباط صريح بين نماذج استخدام الطاقة ومستوياتها مع أي «تحسين في الآليات الثقافية». إلا أن هذا التصميم المتعلق بالطاقة، شأنه شأن أي تفسير اختزالي، يبقى مضللاً إلى حد بعيد.

أعطى جورجسكو روجن Georgescu-Roegen أ(1980، 264) تمثيلاً جميلاً يحيط أيضاً بالتحديات القابعة أمام التفسيرات التاريخية، إذ رأى أن الهندسة تقيد طول القطرين في مربع ما، ولا علاقة لها بلونه، «وكيف أصبح المربع أخضر اللون على سبيل المثال، يبقى سؤالاً مختلفاً وشبه مستحيل». وعليه، فإن كل مجال من مجالات العمل لدى مجتمع ما وإنجازه المادي يبقى محكوماً بالضرورات التي تظهر من الاعتماد على تدفقات طاقة معينة ووسائط تحريك أساسية محددة - لكن حتى الحقول الصغيرة بوسعها تشكيل لوحات رائعة لا يسهل تفسيرها. ليبقى جمع الأدلة التاريخية بخصوص هذا الاستنتاج سهلاً في الجوانب العظيمة والصغيرة على حد سواء.

صيغت مبادئ أخلاقية شاملة ودائمة من قبل قدماء المفكرين والفلاسفة الأخلاقيين والذين جاؤوا بالأديان المعمرة في الشرق الأوسط والهند والصين في مجتمعات منخفضة الطاقة انشغل معظم سكانها بعوامل البقاء المادي الأساسية. وظهرت المسيحية والإسلام، العقيدتان التوحيديتان السائدتان اللتان لا تزالان تحملان تأثيراً هائلاً في الشؤون الحديثة قبل 20 و13 قرناً على الترتيب، في ظروف قاحلة لم يكن لدى المجتمعات الزراعية فيها تقنيات لتحويل أشعة الشمس الوافرة إلى طاقة مفيدة. أما الإغريق في العصر الكلاسيكي فغالباً ما كانوا يشيرون إلى عبيدهم بطريقة تضعهم بمستوى الحيوانات العاملة (حيث أطلقوا عليهم مصطلح ذوات الأقدام *andrapoda*، مقابل القطيع رباعي الأرجل، *tetrapoda*)، إلا أنهم أعطونا أفكاراً أساساً حول الحرية الفردية والديمقراطية. أما التطور المتزامن للحرية والعبودية فيبقى أحد الجوانب البارزة في التاريخ الإغريقي (فينلي Finley أ1959) وإقراراً بالمساواة بين الناس وبالعبودية في أوائل عهد الجمهورية الأمريكية.

أقرت الولايات المتحدة دستورها الحالم («خلق الناس متساوين») فيما كان المجتمع يعتمد بشكل أساسي على طاقة الخشب، وكان جايمس ماديسون James Madison أ(1751-1836)، وهو من أبرز واضعي مسودة ذلك الدستور والرئيس الرابع للبلد، من ملاك العبيد، شأنه شأن الرئيس الأول جورج واشنطن George Washington أ(1732-1799) والثالث توماس جيفرسون (1743-1826). وفي أواخر القرن التاسع عشر تبنت ألمانيا العمل العسكري واعتمدت الفاشية بعدها بجيلين لتصبح بذلك البلد الأوروبي الرائد على مستوى القارة في استهلاك

الطاقة، في حين دخلت إيطاليا وإسبانيا دائرة النظام الديكتاتوري في عشرينيات وثلاثينيات القرن الفائت على الترتيب، حيث اندرج استخدام الفرد فيهما للطاقة بين أدنى المستويات على مستوى القارة، ليبقى متخلفاً عن نظيره في ألمانيا بأجيال.

لم يكن للإنجازات الفنية علاقة كبيرة بأي مستوى معين من الطاقة أو استخدامها أو مع أي نوع آخر من أنواع الطاقة المستخدمة في نشأة تلك الإنجازات. فإيجاد أعمال خالدة من آداب أو لوحات أو منحوتات أو عمارة أو عروض موسيقية لم يرتبط بتطورات على مستوى معدل استهلاك الطاقة في المجتمع. وفي العقد الأول من القرن السادس عشر، كان ممكناً لأحد المتشردين في ميدان سينيوريا Piazza della Signoria بمدينة فلورنسا أن يتخطى في بضعة أيام ليوناردو دافنشي Leonardo da Vinci ورافايل Raphael، ومايكل أنجلو Michelangelo وبوتيتشيلي Botticelli، ما يمثل سلسلة من المواهب الإبداعية التي لا يمكن للمرء قطعاً تفسيرها من زاوية حرق الخشب وتسخير حيوانات الجر التي مثلت الممارسات الشائعة التي قد تشاهد في أي مدينة معاصرة أخرى في إيطاليا أو أوروبا أو آسيا.

لا يمكن لأي اعتبارات متعلقة باستخدام الطاقة أن تفسر وجود جلوك Gluck وهايدن Haydn وموتسارت Mozart في غرفة واحدة داخل فندق جوزيف الثاني بفيينا في ثمانينيات القرن الثامن عشر؛ أو أن تعطي إمكانية قراءة رواية إميل زولا Émile Zola الأخيرة في تسعينيات القرن التاسع عشر، وتحديداً في باريس في فترة أواخر القرن قبل أن يشاهد المرء آخر لوحات كلود مونيه Claude Monet أو كاميل بيسارو Camille Pissarro يوم كان جوستاف دوريه Gustave Doret يقود الأوركسترا وهي تعزف «مقدمة ظهيرة جني الغاب» *L'Apres-midi d'un faun* لكلود ديبوسي Claude Debussy (الشكل 7-11). أضف إلى ذلك أن الفن لا يظهر تطوراً يكافئ عصور الطاقة: فرسومات الحيوانات التي شوهدت في كهوف العصر الحجري الحديث في جنوب فرنسا، وأجزاء المعابد الكلاسيكية في اليونان وجنوب إيطاليا، وأصوات الأناشيد التي تصدح في العصور الوسطى من الأديرة الفرنسية لا تقل متعة وإبهاجاً، كما لا تقل حداثة عن الأعمال الملونة لخوان ميرو Joan Miró، أو المنحنيات التي تطغى على أبنية كينزو تانج Kenzo Tange، أو الإثارة والشجن في موسيقى رحمانينوف Rachmaninov.

وفي القرن العشرين، لم يكن لمستوى استخدام الطاقة ارتباط كبير بالتمتع بالحريات السياسية والشخصية، إذ نجدها اتسعت في الولايات المتحدة الغنية بالطاقة، وكذلك في الهند فقيرة الطاقة؛ كما قمعت في الاتحاد السوفييتي الغني بالطاقة ومازالت تكبح في باكستان التي تعيش ندرة في الطاقة. وبعد الحرب العالمية الثانية، استخدم الاتحاد السوفييتي إبان حكم ستالين وما بعده، وكذلك بعض بلدان



الشكل 7-11

«صباح الربيع، شارع مونمارتر». لوحة زيتية على قماش القنب للفنان كاميل بيسارو عام 1897 (مشروع فنون جوجل).

الإمبراطورية السوفييتية سابقاً، كمّاً من الطاقة فاق ما استخدمته بلدان أوروبا الغربية التي تعيش الديمقراطية، مع ذلك لم تستطع أن توافر لشعوبها نوعية حياة مقارنة، ما شكل عاملاً رئيساً وراء انهيار الشيوعية. واليوم نجد في المملكة العربية السعودية الغنية بالطاقة مستوى من الحريات تختلف عن التي نجدها في الهند فقيرة الطاقة (بيت الحرية 2015).

وبالمثل، لم توجد أي روابط متينة بين استخدام الفرد للطاقة والأحاسيس الشخصية بالرضا بالحياة أو بالسعادة الشخصية (دينر Diener، وسوه Suh، وأويشي Oishi 1997أ؛ وليارد Layard

أ2005؛ وبروني Bruni وبورتا Porta أ2005). فالبلدان العشرون الأولى على مؤشر الرضا لم تضم سويسرا والسويد الغنيتين بالطاقة، في حين ضمت بلداناً منخفضة الطاقة نسبياً مثل بوتان وكوستا ريكا وماليزيا، بينما حلت اليابان (في المرتبة التسعين) بعد أوزبكستان والفلبين (وايت White أ2007). أما التقرير العالمي للسعادة الصادر عام 2015 (هيليويل Helliwell وليارد Layard وساكس Sachs أ2015) فيصنف بلداناً متوسطة من حيث استخدام الطاقة كالمكسيك والبرازيل وفنزويلا وباناما من بين أسعد 25 بلداً، وجميعها حلت قبل ألمانيا وفرنسا واليابان والمملكة العربية السعودية.

من الواضح أن تلبية الاحتياجات البشرية يتطلب مستوى متوسطاً من مدخلات الطاقة، إلا أن المقارنات الدولية تظهر بوضوح أن المكاسب الأخرى على مستوى نوعية الحياة وصلت إلى الاستقرار رغم ارتفاع استهلاك الطاقة. ويمكن للمجتمعات التي تركز على رفاه الإنسان بدرجة أكبر ما تركز على الاستهلاك التافه الوصول إلى نوعية حياة أعلى رغم استهلاكها لكم من الوقود والكهرباء يعد جزءاً ما تستخدمه البلدان التي تعيش مستوى إسراف أكبر. ولعل المقارنة بين اليابان وروسيا، أو كوستا ريكا والمكسيك، أو إسرائيل والمملكة العربية السعودية يوضح المسألة. ففي هذه الحالات كافة حملت الحقائق الخارجية المتعلقة بتدفقات الطاقة أهمية ثانوية بالنسبة للدوافع والقرارات الداخلية. فاستخدام الفرد للطاقة بمستويات متماثلة إلى حد كبير (كما في روسيا ونيوزيلندا على سبيل المثال) يعطي نتائج شديدة التباين. وبالمقابل، أدت معدلات استهلاك الطاقة المتفاوتة بدرجة كبيرة إلى مستويات متماثلة من نوعية الحياة المادية على نحو مدهش: فلدى كوريا الجنوبية وإسرائيل مؤشر شبه متطابق من التطور البشري في حين يبقى استخدام الفرد الكوري للطاقة أعلى بنحو 80%.

إن تصوير الروح الكامنة خلف واجهة الواقع المادي متطابق بالمثل إذا ما نظرنا إلى الهوية الافتراضية للبنى والعمليات التي تتطلب طاقة مرتفعة حول العالم. فالضروريات العالمية لطاقتها والمدخلات المادية ومتطلبات التشغيل تجعل من أفران الصهر في الوسط الغربي الأمريكي ومنطقة رورجيبيت الألمانية ودونيتس الأوكرانية ومحافظة هيباي الصينية وكيوشو اليابانية وبهار الهندية شبه متطابقة ظاهرياً، بيد أنها ليست متماثلة عند النظر إليها ضمن السياق الشامل. أما الجوانب المميزة لها فتتعلق بخليط من البيئات الثقافية والسياسية والاجتماعية والاقتصادية والاستراتيجية التي نشأت ولا تزال تعمل فيها، فضلاً عن الوجهة الأخيرة ونوعية المنتجات النهائية المصنوعة من المعدن الذي تصهره تلك الأفران.

أما الرابطة الجوهرية الأخرى التي تكون فيها تفسيرات الطاقة محدودة النفع فتتعلق بتأثير الإمداد بالطاقة في النمو السكاني إذ تُظهر معظم أعمال إعادة بناء التركيبة السكانية الموثوقة بالنسبة إلى أوروبا والصين، على المدى البعيد، فترات طويلة جداً من النمو البطيء، تتألف من موجات متعاقبة من التوسع وأزمات ناجمة عن أوبئة وحروب (ليفي باتشي Livi-Bacci أ2000، 2012). لقد كان إجمالي عدد السكان الأوروبيين في النصف الأول من القرن الثامن عشر نحو ثلاثة أضعاف عددهم في بدايات التاريخ الميلادي، لكنه تضاعف أكثر من ثلاث مرات بحلول عام 1900. ولعل تحسن التغذية كان سبباً رئيساً وراء هذه الزيادة، إلا أن حصرها في هذا العامل

الوحيد وحسب (مكين 1976) لا يمكن أن يتوافق مع عمليات إعادة البناء الدقيقة لمعدل استهلاك الطاقة الغذائية (ليفي باتشي 1991).

وإذا ما أردنا أن ننسب الزيادة السكانية في أوروبا ما بعد عام 1750 إلى استهلاك أكبر في الطاقة (يترجم إلى مستوى أفضل من السكن والقواعد الصحية والرعاية الطبية)، فكيف لنا أن نفسر الزيادة المتزامنة في عدد سكان الصين منذ حكم أسرة تشينغ؟ ففي عام 1700 كان إجمالي عدد سكان الصين لا يتعدى ثلاثة أضعاف عددهم إبان حكم أسرة هان عام 145، لكن بحلول عام 1900 تطابقت زيادة عدد السكان في الصين مع النمو السكاني الأوروبي الذي ازداد ثلاثة أضعاف ليصل إلى نحو 475 مليون نسمة. مع ذلك لم تشهد تلك الفترة تحولات جسيمة باتجاه مصادر طاقة أو وسائط تحريك أولية جديدة، وبالكاد عاشت شيئاً من التحسن في معدل استخدام الفرد لوقود الكتلة الحيوية والفحم، دونما مكاسب كبيرة في معدل إمداد الفرد بالأغذية: في واقع الأمر شهدت الفترة أسوأ مجاعات ضربت الصين في 1876-1879.

ولا عجب ألا تساعدنا اعتبارات الطاقة إلا قليلاً عند محاولة تفسير بعض من أعظم الألغاز المتكررة عبر التاريخ، ألا وهي انهيار المجتمعات المعقدة. ولعل التساؤلات حول هذا التحدي الشائق (تاينتر Tainter أ1988؛ بونتينج Ponting أ2007ح دياموند Diamond أ2011؛ فاولسايت Faulseit أ2015) توصلنا إلى إجابات بسيطة فقط في حال رغب المتسائلون في تجاهل التعقيدات غير الملائمة. وقد اشتملت معظم التفسيرات البارزة المتعلقة بالطاقة على تأثيرات انتشار تدهور النظام البيئي الناجم عن اتباع أساليب زراعية بعيدة عن الاستدامة والإفراط بإزالة الغابات وما ينجم عن ذلك من انخفاض في إنتاج الأغذية. أما استحالة توحيد الإمبراطوريات العظمى بشكل فعال بسبب ضعف النقل البري وارتفاع أعباء الموارد اللازمة لحماية الأراضي النائية (متلازمة التمدد الإمبراطوري) فتندرج بين التفسيرات الشائعة الأخرى.

لكن وفقاً لما أوردته عشرات الأسباب المختلفة التي عُرضت لتفسير سقوط الإمبراطورية الرومانية - وهو أكثر «الانهيارات» خضوعاً للدراسات عبر التاريخ (رولينز Rollins أ1983؛ سميل 2010ج) - نجد أن التفسيرات التي تميل إلى التفكك الاجتماعي أو الصراعات الداخلية أو إلى شن الغزوات أو تفشي الأوبئة أو إلى التغير المناخي هي التفسيرات الشائعة. ولعل الحقيقة التي لا جدال فيها أن الكثير من أمثلة الانهيار الاجتماعي والسياسي قد ضُربت من دون دليل قاطع حول ضعف قاعدة الطاقة. فلا التفكك البطيء الذي أصاب غرب الإمبراطورية الرومانية، ولا الدمار المفاجئ لتيوتيهواكان Teotihuacan يمكن ربطه بشكل مقنع بتدهور القدرة على إنتاج الأغذية، أو بأي تحولات ملحوظة في وسائط التحريك الأولية المهيمنة، أو بأي تغيرات جسيمة في استخدام وقود الكتلة الحيوية. بالمقابل، لا يمكن ربط عدد من أشكال الدعم والتوسع الكبير تاريخياً -بما في ذلك النهوض التدريجي لمملكة مصر القديمة، وظهور جمهورية الرومان كقوة مهيمنة في إيطاليا، والانتشار السريع للإسلام في القرن السابع، والغزوات المنغولية في القرن الثالث عشر- بأي تغيرات جسيمة في استخدام وسائط التحريك الأولية والوقود.

يبقى من السهولة بمكان وضع مخطط للسيناريوهات المستقبلية المتطرفة. فمن ناحية، يمكننا إدراك أن الفهم الذي تسيطر عليه الحضارة الغربية اليوم قد يأخذها إلى ما وراء الأنماط السلوكية

الأساسية. ويمكن لانتشار هذه المعرفة أن يخلق حضارة عالمية حقيقية تعرف كيف تعيش ضمن حدود المحيط الحيوي والازدهار لآلاف السنين القادمة. ومقابل هذه النقطة مباشرة يكمن جدل بأن المحيط الحيوي يخضع أصلاً للأنشطة البشرية التي تتدخل في كثير من العمليات الداعمة للحياة، وتتعدى حدود الكوكب التي تُعرّف مجال التشغيل الآمن للبشرية (مركز استكهولم للمرونة 2015). وبالتالي، يمكن على التوازي من ذلك أن ندرك أنه -إذا ما نحينا جانباً إمكانية الحرب النووية الشاملة- قد تنهار الحضارة العالمية عالية الطاقة قبل دنوها من حدود مواردها بوقت طويل. أما المسافة الشاسعة التي تفصل بين هاتين النقطتين المتطرفتين فيمكن تعبئتها بكثير من السيناريوهات التي تتراوح بين تسبب الاستمرارية المؤقتة في انعدام العدالة العالمية، أو حتى تعميقها، وإحداث تقدم بطيء، لكن مهم، نحو المزيد من السياسات العقلانية الوطنية منها والعالمية.

وبصرف النظر عن احتمالات اصطدامنا بجرم سماوي، أو حدوث ثوران بركاني هائل، أو تفشي جائحات فيروسية غير مسبوقة (لتقييمها، انظر سميل 2008ب)، نرى أن احتمال تبديد الطاقة التدريجي الناجم عن تدهور المحيط الحيوي إلى مستوى خارج إمكانية العيش المستدام فيه ربما يبقى احتمالاً أكبر من الدمار المفاجئ مثلما حدث لتيوتيهواكان. ولن أعرض أياً من التوقعات المتعلقة بفرص الخلل الوظيفي الاجتماعي المدمر، ولا الحروب التي تدور رحاها حول العالم، ولا تفشي الأوبئة، لكني سأقتصر على الإشارة إلى تعايش حالتين من التوقعات المتناقضة بخصوص أساس الطاقة لدى مجتمع حديث: التحجر المزمن (غياب التخيل؟) بخصوص قوة الابتكار التقني، مقابل الادعاءات التي يتم تضخيمها بشكل متكرر باسم مصادر الطاقة الجديدة.

ثمة قائمة طويلة من التوقعات التقنية الخاطئة (جامارا Gamarra أ1969؛ بوج Pogue أ2012)، لكن بعضاً من أكثر المواد الجديرة بالذكر ذات صلة بتنمية واستخدام عمليات تحويل الطاقة (سميل 2003). فقد استبعد الخبراء آنذاك احتمالية الإنارة بالغاز، والسفن البخارية، ومصابيح الفتائل المتوهجة، والهواتف، ومحركات البنزين، والطيران بالمحركات، وكذلك التيار المتناوب، والمذياع، والدفع الصاروخي، وسواتل الاتصالات التي تعمل بالطاقة النووية، والحواسب الهائلة. وغالباً ما استمر هذا الموقف المحافظ حتى بعد ظهور الابتكارات وتكللها بالنجاح. فالرحلات البحرية عبر الأطلسي باستخدام السفن البخارية بدا أنها غير ممكنة نظراً للاعتقاد بأن تلك السفن لم تكن قادرة على حمل كمية وقود تكفي لتلك الرحلات الطويلة. وفي عام 1896 رفض لورد كيلفين الانضمام إلى الجمعية الملكية لعلوم الفضاء: إذ جاء في رسالته التي خطها بيده إلى بادن ف. س. بادن باول Baden F.S. Baden-Powell، وكان مؤيداً ومتحمساً للطيران العسكري، أنه «ليس لديّ ذرة إيمان بالملاحة الجوية غير الطيران بوساطة المنطاد» (تومسون Thomson أ1896). وفي الوقت الذي كان فيه عشرات مصنعي السيارات ينتجون سيارات بكفاءة وموثوقية أكبر، رأى بيرن Byrn أ(1900، 271) أنه «من غير المحتمل أن يدير الإنسان أموره من دون الخيل».

وكانت استمرارية أسطورة الطاقة بارزة أيضاً. فقد غلب على الاعتبارات أن أنواع الطاقة الجديدة لا تحمل معها أي مشكلات تذكر إن كانت موجودة أصلاً. فهي تعد بإمداد وفير وزهيد التكلفة، كما تفتح الباب على مصراعيه أمام إمكانيات إحداث تغير اجتماعي أشبه بالمدينة الفاضلة (باسالا

Basalla أ1982؛ سميل 2003، 2010أ). وبعد آلاف السنين من الاعتماد على وقود الكتلة الحيوية، وجد كثير من كتاب القرن التاسع عشر في الفحم مصدراً مثالياً للطاقة، وفي المحرك البخاري محركاً أساساً أشبه بالأعجوبة. إلا أن تلوث الهواء بنسب عالية، وتدمير الأرض، وما ظهر من مخاطر صحية وحوادث ناجمة عن التعدين، وكذلك الحاجة إلى العودة إلى احتياطي الفحم الذي يزداد رداءة وعمقا باستمرار أنهى تلك الأسطورة. أما الكهرباء فقد كانت الحامل التالي للاحتمالات التي لا حدود لها، فالطاقة التي تغذي بها قادرة على الوصول إلى مسافات بعيدة لدرجة تُمكّن من التملص من براثن الفقر وشبح المرض (المربع 7-5).

لعل ما يمكن التنبؤ به بدرجة كبيرة من اليقين أن ثمة حاجة إلى كم أكبر من الطاقة على مر الأجيال القادمة لتوفير عيشة كريمة لسكان المعمورة بأعدادهم المتزايدة الذين يحصلون على كم من الطاقة أدنى بكثير من الحد الأدنى قياساً بالكمية المطلوبة لحياة كريمة. قد يبدو ذلك مهمة جسيمة، بل مستحيلة. فالحضارة العالمية مرتفعة الطاقة تعاني أصلاً اقتصادياً واجتماعياً من اتساعها غير المسؤول، ونموها بدرجة أكبر يهدد سلامة المحيط الحيوي الذي يعتمد عليها في بقائه (سميل 2013أ؛ روكستروم Rockström وآخرون 2009).

مع ذلك يبقى غياب اليقين مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً بجدوى العيش في المناطق الحضرية على المدى البعيد. فالترابط الاجتماعي وتنشئة الأسرة من صفات الحياة الريفية وواضح أنها لا تسود في المدن الحديثة، وضغوطات الحياة الحضرية على السكان الذين عاشوا فترة طويلة في الريف مترابطين تظهر لدى الأمم الغنية والفقيرة على حدّ سواء. صحيح أن نسبة الجريمة انخفضت بصفة عامة في كثير من البلدان، إلا أن أحياء مترامية الأطراف في كثير من كبريات مدن العالم تبقى بؤراً للعنف، والإدمان على المخدرات، والتشرد، ونبذ الأطفال، والدعارة، والحياة القذرة. رغم ذلك، نجد أن ضرورات الاقتصادات الحديثة تتطلب استقراراً اجتماعياً واستمرارية التعاون الفعال. واستمر تجديد المدن من خلال الهجرة الدائمة من القرى - لكن السؤال المطروح ما الذي سيحدث للحضارة الموجودة أصلاً كحضارة مدنية في معظمها حالما تختفي القرى في آخر المطاف في الوقت الذي يستمر فيه تفكك البنية الاجتماعية للمدن؟

لكن ثمة مؤشرات تبعث على الأمل. فنظراً لأن إجمالي استخدام الطاقة لا يحدد سياق التاريخ، فإن بوسع التزامنا وقدرتنا على الاختراع المضي لمسافات بعيدة نحو إضعاف الرابطة التطورية بين تطورات الحضارة والطاقة ومن ثم عكس اتجاهها. والآن بتنا ندرك أنه من غير الممكن مساواة النمو في استخدام الطاقة بالتعديلات الفعالة، وأنه يجب أن يكون بمقدورنا إيقاف هذا الاتجاه وحتى عكسه، وتحطيم القول المأثور لقانون الطاقة العظمى الذي جاء به لوتكا (1925). كما ينبغي على هذه الخطوة أن تكون أسهل نظراً للإشارات الواضحة بأن زيادة مخرجات الطاقة إلى المستوى الأعظم يأتي بنتائج عكسية.

إن استخدام كم أكبر للطاقة لا يقدم في الحقيقة أي ضمان غير مزيد من الأعباء البيئية (سميل 1991). والدليل التاريخي على ذلك واضح. فاستخدام كم أكبر من الطاقة لا يضمن إمدادات غذائية يعوّل عليها (فروسيا القيصرية التي كانت تعتمد على حرق الأخشاب كانت مستوردة للحبوب؛ وكذلك الاتحاد السوفييتي، القوة العظمى في مجال المواد الهيدروكربوناتية، كان عليه

استيراد الحبوب أيضاً)؛ كما لا يمنح الأمن الاستراتيجي (فقد كانت الولايات المتحدة بالتأكيد أكثر أماناً عام 1915 منه عام 2015)؛ فضلاً عن أنه لن يدعم الاستقرار السياسي بطريقة آمنة (سواء في البرازيل أم في إيطاليا أم في مصر) ولن يؤدي بالضرورة إلى مستوى أعلى من الحوكمة المستنيرة (فالحال ليست هكذا لا في كوريا الشمالية ولا في إيران)؛ ناهيك عن أنه لن

المربع 7-5

وعد الكهرباء المفتوح

الكهرباء هي الشكل الأكثر تنوعاً من أشكال الطاقة، وقد ألهم وعدها متعدد الأوجه المبتكرين، من أمثال أديسون Edison وويستينجهاوس Westinghouse وشتاينميتز Steinmetz وفورد Ford، والساسة على حد سواء، حيث غالباً ما نجد هذه الشريحة الأخيرة عند النهايات المقابلة لطيف القيمة، من أمثال لينين وروزفلت. وحتى قبل نهاية الحرب الأهلية الروسية، خلص لينين Lenin أ(1920، 1) إلى أن النجاح الاقتصادي «يمكن ضمانه فقط في حال استطاعت الدولة البروليتارية الروسية التحكم بآلة صناعية ضخمة مصنوعة وفق أحدث التكنولوجيات؛ ما يعني التغذية بالطاقة الكهربائية». واحتفظ «الفحم الأبيض» للطاقة الكهرومائية بأهمية خاصة وسط التكنوقراطيين الغربيين لغاية خمسينيات القرن الفائت، عندما تفوق عليه الوعد غير المسبوق للطاقة النووية.

وفي عام 1954 أخبر لويس شتراوس Lewis L. Strauss أ(1896-1974)، الذي شغل منصب رئيس المفوضية الأمريكية للطاقة الذرية بين عامي 1953 و1958، الجمعية الوطنية للكُتاب العلميين في نيويورك:

سيستمتع أولادنا بالطاقة الكهربائية في منازلهم بأسعار زهيدة جداً. ونحن لا نسترسل في توقعاتنا إن قلنا إن أولادنا سيمرون على المجاعات الإقليمية المخيفة التي تكررت دورياً في العالم مرور الكرام كتاريخ فقط، وسيكون بوسعهم السفر بكل يسر عبر البحار وتحتها وفي الجو، بأقل مستوى من المخاطر وبأكبر السرعات، كما سيعيشون أعماراً أطول ما نعيش بكثير، حين يستسلم المرض ويفهم الإنسان مسببات شيخوخته. إنه التنبؤ بعصر السلام. (شتراوس 1954، 5).

وفي عام 1971، تنبأ جلين سيبورغ Glen Seaborg، رئيس المفوضية الأمريكية للطاقة الذرية، أنه بحلول عام 2000 ستأتي نصف استطاعة الكهرباء التي يتم توليدها في أمريكا من مفاعلات نووية آمنة وغير ملوثة، وستكون تلك المركبات الفضائية التي تعمل بالطاقة النووية بمثابة عبّارات للإنسان تنقله إلى المريخ (سيبورغ 1972). في الواقع، شهدت ثمانينيات القرن الماضي نهاية شبه تامة لطلبات بناء محطات نووية جديدة في الغرب، أما التوقعات المخيفة المتعلقة بالانشطار النووي فقد زادها سوءاً حادثة تشرنوبل عام 1986، وسلسلة انفجارات

فوكوشيما عام 2011. إلا أن العنفات الهوائية والخلايا الكهرضوئية التي دخلت إلى الفراغ الأسطوري الناجم عن الانسحاب الغربي من الانشطار النووي بالتزامن مع قطع وعد بتوليد الكهرباء بطريقة جد يسيرة وبتكلفة زهيدة يجعل من الطاقة اللامركزية (التي تقصي المحطات المركزية كافة) تتنزل على العالم الحديث كما تنزل المَنّ (رؤية تستوجب تجاهل حقيقة أن معظم سكان العالم سيعيشون في مدن كبرى، يصعب جداً اعتبارها الموقع الأنسب للطاقة اللامركزية). وليأتي من بعد ذلك، كما كانت عليه الحال منذ 1945، الوعد المطلق بالكهرباء التي يتم توليدها من الانشطار النووي (مع أننا اليوم لسنا أقرب إلى الهدف ما كنا عليه قبل جيل من الآن من الناحية العملية).

يفضي إلى تحسينات مشتركة على نطاق واسع تطال المستوى المعيشي لسكان إحدى الأمم (إذ لم نر ذلك لا في غواتيمالا ولا في نيجيريا).

ويمكن التعرف على فرص الانتقال الهائل نحو مجتمع أقل كثافة استهلاك للطاقة بشكل رئيس وسط الأطراف التي تسيء بشكل بارز استخدام الطاقة والمواد في أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية واليابان. ويمكن إدراك كثير من هذا التوفير بيسر غريب. وفي هذا المقام، أوافق ما جاء به باسالا (1980، 40) إذ يقول:

إن كانت معادلة الطاقة-الحضارة عديمة القيمة وتنطوي على خطورة محتملة فيجب توضيح ذلك وإلغاؤها كونها تسبب جدلاً علمياً مفترضاً ضد جهود اعتماد نمط حياة ما يستند إلى مستويات أدنى من استهلاك الطاقة. وإن كانت تعميماً لحقيقة عظيمة وثروة فكرية، عندها تستحق تعاملاً معقداً وصارماً قياساً بما تلقته من دعم لها حتى تاريخه.

ونظراً لاطلاعي على انعدام كفاءة الحضارة الحديثة الهائل في استخدام الموارد، سواء أكان ذلك المورد طاقة أم غذاءً أم مياهاً أم معادن، أجدني أنادي باتباع طرائق أكثر عقلانية في الاستهلاك. وهذا السياق سيحمل تبعات عميقة تتعلق بتقييم التوقعات التي تخص الحضارة عالية الطاقة - إلا أن أي اقتراحات لخفض متعمد لاستخدام موارد معينة يبقى مرفوضاً لدى أولئك الذين تكونت لديهم قناعة بأن التطورات التقنية التي لا نهاية لها بوسعها أن تلبي الطلب المتزايد تزايداً مطرداً. على أي حال، يبقى تحديد مدى احتمال تطبيق مبادئ الترشيد والاعتدال في استهلاك المصادر بصفة عامة واستخدام الطاقة بصفة خاصة لاسيما في احتمال المضي في هذا الطريق ضرباً من المستحيل.

إن السمتين الجوهريتين للحياة تتمثلان في التوسع وزيادة مستوى التعقيد. والأسئلة المطروحة هي: هل بوسعنا عكس هذين الاتجاهين من خلال اعتماد تحول مجدٍ تقنياً ومرغوب بيئياً نحو استخدامات معتدلة للطاقة؟ هل بوسعنا الاستمرار في التطور البشري من خلال التركيز فقط على تلك الجوانب التي لا تتطلب زيادة تدفقات الطاقة إلى المستوى الأعظم، وهل نستطيع إيجاد

حضارة منتظمة من حيث الطاقة تعيش بشكل صارم ضمن حدود طاقتها الشمسية وحدود محيطها الحيوي؟ وهل يمكن تنفيذ هذه النقلة دونما تحول في نهاية المطاف نحو اقتصاد متوقف عن النمو وتخفيض العدد الراهن لسكان العالم؟ سيعني هذا بالنسبة للأفراد فصلاً ثورياً آخر ما بين الحالة الاجتماعية والاستهلاك العالمي. لا شك أن إعداد مجتمعات كهذه سيحمل أعباءً لاسيما على الأجيال الأولى التي تقوم بهذه الحركة الانتقالية. وعلى المدى الأبعد، ستعمل هذه الترتيبات الجديدة على الإطاحة بإحدى الدعامات الرئيسة للتقدم الغربي، ألا وهي السعي نحو الحِراك الاجتماعي والاقتصادي. أم هل بوسع الاختراقات التقنية الجديدة أن تتيح لنا تسخير نسبة كبيرة من الإشعاع الوارد، بشكل مباشر وبكفاءة عالية، وضمان إدماننا على عدد لا حصر له من عوامل الراحة الخارجية؟

إن نظام الطاقة الراهن لدينا مقيد لذاته. فحتى على نطاق زمني تاريخي نجد أن حضارتنا عالية الطاقة، التي تستغل المخزون المتراكم من الإشعاع القديم المحول إلى وقود، هي مجرد فترة فاصلة، فحتى إن لم يحمل حرق الوقود تأثيرات بيئية، لما أمكنه، البقاء لآلاف السنين خلافاً لسلفه، اعتماداً على حصاد تدفقات طاقة شمسية شبه آنية. إلا أن استنفاذ الطاقة الأحفورية يبقى بعيد الاحتمال بمعظمه نظراً لأن حرق الفحم والمواد الهيدروكربوناتية يبقى المصدر الرئيس لثاني أكسيد الكربون الناجم عن النشاط البشري، وإن حرق مصادر الوقود الأحفوري المتاحة سيرفع درجة حرارة التربوسفير إلى مستوى يكفي لإذابة كامل جليد القطب الجنوبي والتسبب في ارتفاع مستويات البحار إلى نحو 58 متراً (فينكلمان Winkelmann وآخرون 2015).

وبالنظر إلى أن السواد الأعظم من سكان المعمورة يعيشون في مناطق ساحلية، سيكون لهذا الارتفاع تبعات هائلة على مستوى بقاء الحضارة. إلا أن التدفق المتاح للطاقة المتجددة كبير بما يكفي لتجنب هذا المصير - لكن لكي نحافظ على المستويات السائدة من استخدام الطاقة، أو زيادتها بالنسبة لمليارات من سكان بلدان الاقتصادات منخفضة الدخل، ينبغي علينا ضبطها، وتخزينها وفق مقاييس أعلى بقيم أسية مقارنة بما قمنا به حتى الآن. فالانتقال التاريخي من نظام طاقة عالمية يهمن عليها الوقود الأحفوري إلى ترتيب جديد يعتمد فقط على تدفقات الطاقة المتجددة يشكل تحدياً جسيماً (لا يلقى تقديراً كافياً في أغلب الأحيان)، لأن اعتمادنا في كل مكان على الوقود الأحفوري ودرجة ذلك الاعتماد، والحاجة إلى زيادة استخدام الطاقة عالمياً بدرجة أكبر، يعني أنه حتى الانتقال الذي يحظى بمتابعة صارمة لا يمكن تحقيقه إلا على مدى أجيال عديدة.

أما الانتقال الكامل فسيتطلب استبدال أنواع الوقود الأحفوري لا كأنواع سائدة توافر أنواعاً مختلفة من الطاقة فحسب، بل كمصادر أساسية أيضاً للمواد الأولية منها مواد أولية لتركيب الأمونيا (نحو 175 مليون طن/العام سنة 2015، معظمها لإمداد المحاصيل بالنيتروجين) وغيرها من الأسمدة والمواد الكيميائية الزراعية (مبيدات الأعشاب ومبيدات الآفات)؛ ومواد أولية لصناعة البلاستيك الذي بات في كل مكان (والذي يزيد إجمالي كمية إنتاجه على نحو 300 ميغا طن/سنة)؛ وفحم الكوك التعديني (الذي يتطلب اليوم نحو 1 جيغا طن من فحم الكوك ويستخدم لا كمصدر للطاقة لاختزال أكسيد الحديد فحسب، بل لدوره الأساس في دعم فلزات الحديد المشحونة وتدفقها في

أفران الصهر التي تنتج سنوياً ما يزيد على 1 جيغا طن من الحديد)؛ ومزلقات (تعد أساساً في عمل الآلات الثابتة والمتحركة)؛ ومواد الرصف (الأسفلت الرخيص).

إن عجزنا عن استيعاب سلوك الكل المعقد والمترابط - كتفاعلات عمليات المحيط الحيوي، وتوظيف إنتاج الطاقة، والأنشطة الاقتصادية، وكذلك التطورات التقنية، والتغيرات الاجتماعية، والتطورات السياسية، والعدوان المسلح - يجعل من أي سيناريو معين (شائع التفضيل اليوم) بخصوص المستقبل البعيد مجرد توقع. بالمقابل، يعد رسم مخطط الحالات المتطرفة سهلاً، حيث تتراوح رؤى المستقبل بين الرؤى القاتمة وتلك التي تبعث على النشوة. لكن لم يكن ما جاء به جورجيسكو روجن (1975، 379) مدعاة تفاؤل إذ يقول: «لعل قدر الإنسان أن يعيش حياة قصيرة، لكنها حياة ملتهبة، مليئة بالحماس والإسراف بدلاً من أن يعيش حياة طويلة رتيبة يعاني من العجز. دع الأنواع الأخرى، كالأميبا على سبيل المثال، التي لا طموحات روحية لديها، ترث الأرض التي لا تزال تستحم بأشعة الشمس الوفيرة». بالمقابل، يرى أنصار التكنولوجيا المتفائلون مستقبلاً لطاقة غير محدودة، سواء من خلايا كهرضوئية فائقة الكفاءة أو من الاندماج النووي، أو يرون مستقبل بشرية تستعمر كواكب أخرى عُدلت أجواؤها على نحو يلائم العيش فيها وفقاً لصورة الأرض. أما في المستقبل المنظور (من جيلين إلى أربعة أجيال، 50-100 سنة) فأرى أن هذه الرؤى الواسعة لا تتعدى كونها قصصاً خرافية.

أما اليقين الوحيد فهو أن فرص النجاح في السعي غير المسبوق نحو إيجاد نظام طاقة جديد متوافق مع بقاء حضارة الطاقة العالية على المدى البعيد تبقى فرصاً غير مضمونة. وبالنظر إلى درجة فهمنا، فإن التحدي قد لا يكون صعباً نسبياً أكثر من التغلب على عدد من العقبات التي تمكنا من قهرها فيما مضى. لكن الفهم، بغض النظر عن مدى روعته، لن يكون كافياً. فالمطلوب هو التزام بالتغيير، حيث نضم صوتنا لما قاله سنانكور Senancour أ(1770-1846):

> الإنسان فانٍ. لعل ذلك صحيح، لكن دعونا نكافح ولو كان الفناء مكتوباً علينا؛ فإن كان العدم نصيبنا، ينبغي ألا ندعه يأتينا كجزاء واف. (سنانكور 1901 [1804]، 2:187).

8- ملحقات

مقاييس أساسية

يعد الطول، والكتلة، والزمن، ودرجة الحرارة الوحدات الأساسية في الحسابات العلمية. فالمتر (م) هو الوحدة الأساسية لقياس الطول. فبالنسبة إلى الناس متوسطي الطول فهو بصفة عامة المسافة بين خصورهم والأرض. ومعظم الناس تتراوح أطوالهم بين 1.5 و1.8 م. وارتفاع سقوف المنازل في أمريكا هو 2.5 م؛ والمضمار الأوليمبي طوله 400 م، ومدرج الطائرات النفاثة نحو 3.000 م. وتستعمل السوابق اليونانية القياسية في التعبير عن مضاعفات الوحدات العلمية. فالكيلو يساوي 1.000 وهكذا يكون 3.000 م تساوي 3 كيلو متر (كم). ومسافة سباق الماراثون هي 42.195 كم، والمسافة الجوية بين الساحلين الشرقي والغربي هي 4.000 كم، كما يبلغ طول محيط الأرض عند خط الاستواء 40.000 كم، وتبلغ سرعة الضوء 300.000 كم بالثانية/ و150 مليون كم هي المسافة الفاصلة بين الأرض والشمس. أما السوابق اللاتينية فتستخدم لأجزاء الوحدات. فالسنتيمتر هو جزء من مائة جزء من المتر. فطول قبضة موضوعة على الطاولة والإبهام والأصابع مطوية هو 10 سم (0.1م). وأقلام الرصاص الجديدة طولها 20 سم (0.2م) وطول المواليد حديثي الولادة نحو 50 سم (0.5 م).

أما وحدات المساحة التي نتعامل معها عادة فتتراوح بين سم^2 وكم^2. فالطبق تحت الفنجان يغطي مساحة قدرها 10 سم^2، والسرير 2م^2 وأساس منزل أمريكي ريفي صغير نحو 100م^2. هذه المساحة (10اx10ام) تسمى آر و100 (هكتو) من هذه المربعات تشكل هكتار (هك) وهي الوحدة المترية الأساسية المستخدمة في قياس مساحة الأراضي الزراعية. فسكان الصين وبنغلاديش ينبغي عليهم أن يحصلوا على غذائهم من أقل من 0.1 هك/للفرد، بينما يزرع الأمريكيون 1 هك/للفرد تقريباً. وخارج نطاق الزراعة، تقاس المساحات الكبيرة بالكيلومتر المربع (كم^2). المدن في أمريكا الشمالية التي يبلغ عدد سكانها مليون نسمة تشغل أقل من 500 كم^2؛ كما أن مساحة الدول الأوروبية الصغيرة لا تتجاوز 100.000 كم^2؛ وتشغل الولايات المتحدة مساحة قدرها 10 ملايين كم^2.

ومن الممكن الحصول على وحدات الكتل بسهولة من خلال ملء مكعبات بالماء. فمكعب صغير يتسع لسنتيمتر مكعب (سم^3) - طول ضلعه بعرض ظفر صغير - ويزن (أو بكلمة أدق، تكون كتلته) 1 غرام (غ) عند ملئه بالماء. والمكعب بحجم قبضة اليد يتسع إلى 1.000 سم^3 (10اxا 10اxا 10سم) أو حجم ليتر واحد (ل). وإذا ما ملأناه بالماء صارت كتلته 1.000 غرام (غ) أو كيلوغرام واحد (كغ). والكيلوغرام هو الوحدة الأساس لقياس الكتلة. فالمشروبات الغازية تزن نحو ثلث الكيلوغرام (350غ) والمواليد حديثو الولادة تتراوح أوزانهم بين 3 و4 كغ، أما أوزان معظم

الكبار غير الأمريكيين فتتراوح بين 50 و90 كغ. وتبلغ كتلة السيارة الصغيرة 1.000 كغ تقريباً أو طناً واحداً (يدعى هذا الطن أيضاً بالطن المتري، ط؛ أما الطن الأمريكي القصير فيعادل 907 كغ وحسب). ويصل وزن الحصان الضخم إلى 1 ط؛ أما وزن عربات القطار فيتراوح بين 30 و100 ط، والسفن (كاملة الحمولة) بين بضعة أطنان إلى 500.000 ط.

تعد الثانية (الثواني) وهي فترة زمنية أطول قليلاً من ضربة القلب العادية، وحدة الزمن الأساسية. وفي وضع الراحة، نتنفس مرة واحدة كل أربع ثوانٍ، ونحتاج إلى 10 ثوانٍ لنشرب كأساً من الماء. أما وحدات قياس الزمن الأكبر فهي استثناءات ضمن النظام المتري الخاص بالوحدات العلمية. وأضعاف الثانية لا تتبع النظام العشري بل تتبع نظام العد السومري - البابلي الستيني (الأساس 60). فالضوء الأحمر عند تقاطع طرق مزدحمة يستغرق 60 ثانية، أو دقيقة واحدة. وسلق بيضة حتى تصبح متماسكة يستغرق ثماني دقائق؛ العمل المتوسط في سيمفونية كلاسيكية يستغرق 40 دقيقة. والحمل الطبيعي يستغرق 280 يوماً، وفي كل سنة غير كبيسة 365 يوماً أو 31.536 مليون ثانية؛ ومتوسط أعمار النساء في البلدان الغربية تجاوز الآن 80 عاماً، والزراعة بدأت بالانتشار قبل 10.000 سنة؛ وكانت الديناصورات وفيرة قبل 80 مليون سنة ويقدر عمر الأرض بنحو 4.5 مليون سنة.

ودرجات الحرارة وفق مقياس كالفين تبدأ عند الصفر المطلق. أما النظام المئوي (C) فأكثر انتشاراً حيث يغطي التدريج المئوي النطاق بين تجمد الماء وغليانه إلى مائة درجة ^{o}C. وفي هذا المقياس يكون الصفر المطلق - 273.15 ^{o}C، ويتجمد الماء عند 0 ^{o}C، وتكون درجة الحرارة في يوم ربيعي مشرق نحو 20 ^{o}C ودرجة حرارة الإنسان الطبيعي 37 ^{o}C. والماء يغلي عند الدرجة 100 ^{o}C، ويشتعل الورق عند الدرجة 230 ^{o}C، وينصهر الحديد عند الدرجة 1535 ^{o}C، وتحدث التفاعلات النووية في الشمس عند الدرجة 15 مليون ^{o}C.

ويمكن اشتقاق سائر الوحدات العلمية الأخرى تقريباً من الطول والكتلة والزمن ودرجة الحرارة. فبالنسبة إلى الطاقة والقدرة تكون الاشتقاقات على النحو التالي: إن القوة التي تؤثر في كتلة قدرها 1 كغ ولها تسارع يبلغ 1 م/ثا تساوي 1 نيوتن (N). وقوة 1 N المستعملة لتحرك جسم مسافة 1 م تساوي 1 جول (J) وهي وحدة الطاقة الأساسية. أما الحريرة (الكالوري)، وهي وحدة الطاقة المستعملة غالباً في الموضوعات الغذائية، فتعادل 4.184 جول. وتمثل هاتان الوحدتان كلتاهما كمية صغيرة: فاستهلاك الطعام عند امرأة بالغة نشطة لايزيد على 2.000 حريرة (2Mcal) أو 8.36 ميغا جول. أما القدرة أو الاستطاعة فهي حاصل ضرب الطاقة بالزمن، وبهذا يكون 1 جول/ثا يساوي واطا واحداً (W). فالقسم التالي الذي يحمل عنوان «الاستطاعة في التاريخ» يبين العديد من النشاطات بترتيب الواط التصاعدي.

كثير من الوحدات مثل تلك المستخدمة في قياس السرعة - متر/ثا أو كيلو متر في الساعة كم/سا والإنتاجية - كيلوغرام أو طن بالساعة كغ/سا، ط/سا ليس لها اسم خاص. فالخيل العاملة تتحرك بسرعة 1 م/ثا؛ ومعظم الطرق السريعة تحدد السرعة عند 100 كم/سا. والعبد الذي يطحن الدقيق

بالرحى كان ينتج الدقيق بمعدل لا يزيد على 4 كغ/سا؛ كما أن محصولاً ممتازاً من الدقيق في العصور الوسطى كان 1 ط/هـ.

وبعض المقاييس فقط الموصوفة هنا تشرح معظم ما ظهر في النص. فبالإضافة إلى الطاقة والاستطاعة هناك وحدتا الطول والكتلة الفيزيائيتان الرئيستان (م) و(كغ)، ومقياسا المساحة (هـ) و(كم^2)، وأربعة مؤشرات للزمن (الثانية والساعة واليوم والسنة). وفيما يلي القائمة الكاملة بالسوابق لكن قلة منها فقط (المضاعفات: هكتو، كيلو، ميغا، جيغا؛ والأجزاء: الميللي، واليكرو) هي التي تستعمل استعمالاً متكرراً.

الوحدات العلمية: مضاعفاتها وأجزاؤها

الوحدات الدولية الأساسية

الكمية	الاسم	الرمز
الطول	متر	م
الكتلة	كيلوغرام	كغ
الزمن	الثانية	ثا
التيار الكهربائي	الأمبير	أ
درجة الحرارة	كالفن	ك
كمية المادة	مول	مول

اللمعان	الكاندلا	كند

وحدات أخرى استعملت في النص

المساحة	الهكتار	هـ
	المتر المربع	م^{2}
الكمون الكهربائي	فولط	ف
الطاقة	جول	J
القوة	نيوتن	N
الكتلة	غرام	غ
	طن	ط
الاستطاعة	واط	W
الضغط	باسكال	با
درجة الحرارة	الدرجة المئوية	^{o}C

الحجم	متر مكعب	م^3

المضاعفات المستعملة في نظام الوحدات الدولي

السابقات	الاختصار	الرمز العلمي
داكا	دا	10^{1}
هكتو	هـ	10^{2}
كيلو	ك	10^{3}
ميغا	M	10^{6}
جيغا	G	10^{9}
تيرا	T	10^{12}
بيتا	P	10^{15}
إكسا	E	10^{18}

زيتا	Z	10^{21}
يوتا	Y	10^{24}

الأجزاء المستعملة في نظام الوحدات الدولي

السابقات	الاختصار	الرمز العلمي
دسي	d	10^{-1}
سنتي	c	10^{-2}
ميللي	m	10^{-3}
ميكرو	µ	10^{-6}
نانو	n	10^{-9}
بيكو	p	10^{-12}
فيمتو	f	10^{-15}
أتو	a	10^{-18}

زبتو	z	10^{-21}
يوكتو	y	10^{-24}

التسلسل الزمني لتطور الطاقة

لقد جمعت هذه اللائحة من طائفة واسعة من المصادر التي وردت في النص وفي قائمة المراجع. ويمكن العثور على مزيد من المعلومات حول التسلسل الزمني للتقدم العلمي في ممفورد (1934) جيل (1978) تايلور (1982) ويليلمز (1987) وبنش وهلمانز (1993) أما القراء الراغبون في الاطلاع على أغزر المعلومات بشأن تاريخ التطورات العلمية (المرتبة بحسب مصادر الطاقة وتطبيقاتها وتأثيراتها) فعليهم الرجوع إلى كتاب من 1000 صفحة تقريباً من تأليف كليفلاند وموريس (2014). ولضيق المقام سنحصر هذه اللائحة في التقدم العملي (وبعض الإخفاقات الواضحة): ونغفل الإسهامات الفكرية والعلمية والسياسية والاقتصادية. كل التواريخ القديمة لاشك في أنها تقريبية وقد تورد مراجع أخرى تواريخ مختلفة. فالاختلافات موجودة حتى في التطورات الحديثة: فالتواريخ قد تشير إلى الفكرة الأصلية، أو تاريخ تسجيل الاختراع، أو التطبيق العملي الأول، أو نجاح التسويق التجاري. للاطلاع على مشكلة تأريخ الاختراعات انظر بتروسكي (1993).

قبل الميلاد

+1.700.000ا أدوات أولدوان حادة حجرية (<0.5 م من edge/kg من الحجر)

+250.000ا أدوات حجرية أكولونية

+150.000ا أدوات حجرية موستيرية

أدوات عظمية +ا50.000

أدوات حجرية أورغانشية (قوس وسهام حجرية) +ا30.000

أدوات حجرية حادة مجلانية (12م من edge/kg من الحجر) +ا15.000

تدجين الغنم في الشرق الأوسط +ا9.000

الذرة في وادي أوكساكا +ا7.400

القمح في بلاد ما بين النهرين +ا7.000

تدجين الخنازير في الشرق الأوسط

تدجين البقر في الشرق الأوسط +ا6.500

مصنوعات نحاسية مألوفة في الشرق الأوسط +ا6.000

الشعير في مصر +ا6.000

الذرة في حوض المكسيك

البطاطا في أعالي البيرو وبوليفيا +ا4.400

المحراث الخشبي الخفيف في بلاد ما بين النهرين +ا4.000

+ا3.500 حمير الحمل في الشرق الأوسط

السفن الخشبية في البحر الأبيض المتوسط

شي الفخار والطوب في الأفران

في بلاد ما بين النهرين

الري في بلاد ما بين النهرين

+ا3.200 عربات ذات عجلات في الوركاء

+ا3.000 الشراع المربع في مصر

ثيران الجر في بلاد مابين النهرين

تدجين الإبل

عجلة صنع الفخار في بلاد ما بين النهرين

+ا2.800 بناء الأهرامات في مصر

+ا2.500 البرونز في بلاد ما بين النهرين

أغراض زجاجية صغيرة في مصر

+ا2.000	العجلة ذات العصي في بلاد ما بين النهرين
	العربات التي تجرها الخيل في مصر
	الشادوف في بلاد ما بين النهرين
+ا1.700	ركوب الخيل
+ا1.500	النحاس في الصين
	حقول الأرز في الصين
	تزليق العجلات في الشرق الأوسط
+ا1.300	أداة نثر البذور في بلاد ما بين النهرين
	عربات الخيل ذات العجلتين في الصين
+ا1.200	الحديد أكثر انتشاراً في الهند، الشرق الأوسط وأوروبا
+ا800	رماة السهام الخيالة في سهول آسيا
	الشموع في الشرق الأوسط
+ا600	القصدير في اليونان

سفن البنتكونتر شائعة في اليونان

الطنبور (لولب أرخميدس) يُستخدم في السقاية في مصر

500ا+ سرج الجمال في شمال الجزيرة العربية

السفن ثلاثية المجاديف في اليونان

400ا+ القوس والنشاب في الصين

432 اكتمال البارثينون

300ا+ الركاب في الصين

التروس في مصر واليونان

312 اكتمال طريق أبيا والقناة المائية الرومانية

200ا+ النير الصدري في الصين

الإبحار باتجاه الريح يتقدم في الصين

الأشرعة المدعمة بالعوارض الخشبية في الصين

الحفر بالنقر في سشوان

يد التدوير في الصين

150ا+ ألواح الفلاحة الحديدية في الصين

100ا+ بدء النير العنقي في الصين

تدفئة المنازل بالفحم في الصين

النواعير في اليونان وروما

عجلة اليد الأحادية

الناعورة في الشرق الأوسط

80ا+ التدفئة المركزية في روما

بعد الميلاد

300 النقليات العامة الرومانية تتجاوز 80.000 كم

600ا+ الطواحين الهوائية (إيران)

+ا850	الشراع المثلث في البحر المتوسط
+ا900	نير الطوق وحدوات الخيل شائعة في أوروبا
	الرماح الخيزرانية الحارقة في الصين
+ا980	قناة الهاويس في الصين
+ا1000	انتشار استعمال النواعير في غرب أوروبا
1040	معلومات واضحة عن تحضير البارود في الصين
+ا1100	القوس الطويلة في إنجلترا
+ا1150	انتشار طواحين الهواء في غرب أوروبا
+ا1200	بناء الطرق عند الإنكا
+ا1280	المدافع في الصين
+ا1300	البارود والمدافع في أوروبا
1327	إكمال القناة العظيمة بين بيجين وهانغزو (بطول 1800 كم)
+ا1350	البنادق اليدوية في أوروبا

طواحين هواء لصرف المياه الزائدة في هولندا

أفران الصهر في منطقة الراين

1420ا+	السفن البرتغالية تبحر في رحلات طويلة
1492	كولومبوس يبحر عبر الأطلسي
1497	فاسكو دا غاما يبحر باتجاه الهند
1519	سفينة ماجلان «فيكتوريا» تبحر حول الأرض
1550ا+	سفن شراعية ضخمة مجهزة بالمدافع في غرب أوروبا
1600ا+	البيليا في غرب أوروبا
1640ا+	استخراج الفحم يزداد في إنجلترا
1690	تجارب على المحرك البخاري الجوي (دنيس بابين)
1698	المحرك البخاري البسيط الصغير (توماس سيفري)
1709	الكوك من الفحم البيتوميني (إبراهام داربي)
1712	المحرك البخاري الجوي (توماس نيوكومن)

1745 الذيل المروحي للاستدارة الآلية في طواحين الهواء

1750+ا كثافة بناء القنوات في أوروبا الغربية

توسع استعمال الكوك في صنع الحديد في إنجلترا

انتشار المحرك البخاري (نيوكومن) في مناجم الفحم الإنجليزية

1757 المخرطة الدقيقة (هنري مودزلي)

1769 جيمس واط يسجل ويحصل على امتياز مكثف منفصل للمحرك البخاري

1770 المصانع تديرها نواعير الماء

1775 امتياز واط يمدد حتى 1800

1782 منطاد الهواء الساخن (جوزيف وإتيين مون غولفيير)

1794 مصابيح ذات حامل للفتيل ومدخنة زجاجية (إيميه أرغاند)

1800 البطارية الكهربائية (ألساندرو فولطا)

1800 القوارب البخارية (شارلوت دنداس، كليرمون)

المحركات البخارية عالية الضغط (رز تريفيثيك، و. إيفانز)

1805 رافعة تعمل بمحرك بخاري (جونريني)

غاز (مدينة) الفحم في إنجلترا

1808 مصباح القوس (همفري دايفي)

1809 اكتشاف النترات التشيلية

1816 مصباح الأمان في المناجم (همفري دايفي)

1820 تصميم الحاسبات الميكانيكية (تشارلز بابيج)

هياكل السفن الحديدية

1820 الكهرومغناطيسية (هانز سي. أرورستد)

1823 عزل السيليكون (جي. جي. بيرزيلوس)

1824 إسمنت بورتلاند (جوزيف أسبدين)

عزل الألمنيوم (هانز سي. أورستد)

1825 خط الحديد بين ستوكتون ودارلينغتون

1828 الصهر الساخن في صنع الحديد (جيمس نيلسون)

1829 القاطرة روكيت (روبرت ستيفنسون)

1830 بناء الخطوط الحديدية يبدأ في إنجلترا

سفينة بخارية تعبر الأطلسي

حصادة قمح ميكانيكية (سايروس ماكورميك، أوبد هسي)

1830 منظمات الحرارة (أندرو أور)

خط حديد ليفربول - مانشستر

1832 العنفات المائية (بنوا فورنيرون)

1833 المحراث الفولاذي (جون لاين)

السفينة البخارية رويال ويليام تبحر من كوبيك إلى لندن

1834 موقد غاز قائم بذاته (فيلو ب. ستيوارت)

1837 التلغراف يحظى بالتسجيل الرسمي (ويليام ف. كوك وتشارلز ويتستون)

1838 الدفع اللولبي للسفن البخارية (جون إركسون) التلغراف (صموئيل مورس)

1840 العقد الذروة لصيد الحيتان في أمريكا

1841 آلة دراسة القمح تعمل بالبخار

توماس كوك يعرض رحلات لقضاء الإجازات

1847 عنفة مائية ذات تدفق داخلي (جيمس ب. فرانسيس)

1850 البارافين من الزيت للإنارة

بواخر سريعة للرحلات الطويلة

1852 المنطاد المليء بالهيدروجين (هنري غيفارد)

1854 السفينة البخارية غريت إيسترن (إيسامبارد ك. برونيل)

185
6
محول الفولاذ (هنري بسمر)

185
8
حصادة القمح (سي. و/ و. و. مارش)

185
9
حفر آبار النفط في بنسلفانيا (ي. ل. دريك)

186
0
الحراثة بالبخار للحقول الواسعة في أمريكا

186
0
محركات الاحتراق الداخلي الأفقية (جي. جي. ي. لينوار)

الحلابات الآلية (ل. و. كولفين)

186
4
عملية صنع الفولاذ بالفرن المفتوح (و/ ف سيمنز)

186
5
نيتروسيللوز (جي. إف. ي. شولتز)

186
6
بطارية الكربون والزنك (جورج لوكلانشيه)

الكبل العابر للأطلسي يعمل باستمرار

الطوربيد (روبرت وايتهيد)

1867 عربات القطار المبردة تدخل الخدمة

1869 إكمال حفر قناة السويس

إكمال خط السكك الحديدية عبر قارة أمريكا.

1870 نقل اللحم المبرد بسفن المحيط

البدء بصناعة سماد الفوسفات

1871 دينامو الكهرباء الملفوف حول النواة الحلقية

1874 فيلم التصوير

1875 الديناميت (ألفرد نوبل)

1876 محرك الاحتراق الداخلي رباعي الشوط

تسجيل اختراع الهاتف باسم (أكسندر غراهام بل، إليشا غراي)

1877 الفونوغراف (توماس أ. إديسون)

1878 محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الشوط (دوغالد كلارك)

المصباح الكهربائي ذو الشعيرة (جوزيف سوان)

الحزامة في حصادة القمح

1879 الشعيرة الكربونية في المصباح الكهربائي (توماس إديسون)

1880 العربات التي تجرها الخيل (كاليفورنيا)

الدراجة الهوائية الحديثة (جي. كي. ستارلي، ويليام ستون)

ناقلات النفط الخام

وضع الصيغة للمفجرات العسكرية القوية

1882 أول مصانع إديسون لتوليد الكهرباء

1883 العنفة البخارية (كارل غوستاف دو لافال)

محرك الوقود السائل رباعي الشوط (غوتليب ديملر)

المدفع الرشاش (هيرام س. مكسيم)

1884 العنفة البخارية (تشارلز بارسونز)

1885 المحول (ويليام ستانلي)

كارل بنز يصنع أول سيارة عملية

1886 الخرسانة مسبقة الإجهاد (سي. ي. دوتشرينغ)

إنتاج الألمنيوم (سي. إم. هول وبي. ل. ت. هيرولت)

1887 اكتشاف النفط الخام في تكساس

توليد الموجات الكهرطيسية (هاينريك هيرتز)

1888 المحرك الكهربائي (نيقولا تسلا)

الغرامافون (إميل بيرلينر)

الإطارات المملوءة بالهواء (جون ب. دنلوب)

1889 أسطوانات الفونوغراف الشمعية (توماس أ. إديسون)

التوربينات المائية التي تعمل بنفث الماء (ليستر أ. بلتون)

1890 عدد الخيل يبلغ ذروته في المدن الغربية

إدخال الأدوات الكهربائية المنزلية

1892 محرك الديزل (رودولف ديزل)

1894 التنقيب عن النفط في البحر من الأرصفة البحرية (كاليفورنيا)

1895 السينما (لويس وأوغست لوميير)

الأشعة السينية (فيلهلم ك. روينتغن)

1897 أنبوب الأشعة المهبطية (فرديناند براون)

1898 جهاز التسجيل (فالديمار بولسن)

1899 الإشارات اللاسلكية تبث عبر القنال الإنجليزي (غوغليلمو ماركوني)

1900 استهلاك الكهرباء يزداد في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة

بدء إنتاج السيارت بالجملة

1900 المنطاد المسير (فرديناند فون زبلين)

1901 تكييف الهواء الصناعي (ويليس هـ. كاريير)

الحفر الدوار (سبيندلتوب، تكساس)

الإشارات اللاسلكية تبث عبر الأطلسي (غوغليلمو ماركوني)

1903 الطيران المستدام الخاضع للتحكم (أوليفر وويلبر رايت)

1904 توليد الكهرباء بالحرارة الأرضية (لارداريلو، إيطاليا)

1905 الصمام الفراغي الثنائي (جون فليمينغ)

1906 الحجيرة الكهرضوئية (آرثر كورن)

إنتاج الجرارات التجارية في الولايات المتحدة

1906 تدشين السفينة الحربية البريطانية دردنوت

الصمام الثلاثي (لي دو فورست)

1908 مصباح التنغستين

فورد طراز T (استمر صنعه حتى 1927)

1909 اللقمة الدوارة المستخدمة في حفر الصخور (هاورد هيوز)

لويس بليريوت يطير عبر القنال الإنجليزي

بايكلايت، أول مادة بلاستيكية رئيسة (ليو بيكلاند)

1910 ضوء النيون (جورج كلود)

غاز مركب من الفحم (فيشر تروبش، ألمانيا)

1913 خط الإنتاج المتحرك (شركة فورد)

إكمال قناة بنما

مركبات الأمونيا (فريتس هيبر وكارل بوش)

تكسير النفط بالضغط العالي (و. م. بيرتون)

1914 الحرب العالمية الأولى (حتى 1918): حرب الخنادق والغازات،

الطائرات، والدبابات.

1919 الطيران عبر الأطلسي من دون توقف (جي. ألكوك وأ. و. براون)

خدمة شركة طيران مجدولة (باريس - لندن)

1920 المراجل تحرق الفحم المتبخر

أجسام الطائرات المعدنية الانسيابية

أجهزة سماع الأسطوانات الموسيقية

البث الإذاعي ينتشر في أمريكا الشمالية وأوروبا

تمييع الفحم (فريدريش بيرغيس)

1920 العنفات المائية ذات التدفق المحوري (فيكتور كابلان)

1922 تدشين شركة الطيران هوشو في اليابان

1923 أنبوب الكاميرا الإلكترونية (فلاديمير زوريكين)

الثلاجات الكهربائية من صنع إلكترولكس

1927 المطاط التركيبي (بونا)

الطيران من دون مرافق عبر الأطلسي من دون توقف (تشارلز أ. ليندبيرغ)

اكتشاف النفط في كركوك بالعراق

1928 بلكسيجلاس (و. باور)

1929 البث التلفزيني التجريبي (المملكة المتحدة)

1930 تكسير النفط بمواد وسيطة (يوجين هودري)

المحطات المائية الضخمة (الولايات المتحدة والاتحاد السوفييتي)

القاذفات بعيدة المدى

استعمال المواد الكلوروفلوروكاربونية في التبريد

1933 بولي إيثلين (الصناعات الكيميائية الإمبراطورية)

1935 ضوء الفلوروسنت (جنرال إلكتريك)

الشريط المغناطيسي البلاستيكي (أز أيز جي تليفونكن، أي. جي. فاربن)

النايلون (والاس كاروذرز)

1936 بث تلفزيوني منتظم (بي بي سي)

العنفة الغازية (براون - بوفري)

1937 الطائرة المضغوطة ضغطاً كاملاً (لوكهيد XC-35)

1938 الأنموذج الأول للمقاتلة النفاثة (هانز بابست فون أوهين)

1939 الرادار

الحرب العالمية الثانية (حتى 1945): بليتزكريغ

194
0
الطائرة العسكرية النفاثة

194
2
صواريخ V-1 (فيرنر فون براون)

إنتاج السيليكون بكميات تجارية

التفاعل المتسلسل تحت التحكم (إنريكو فيرمي، شيكاغو)

194
4
صواريخ V-2

تسويق دي دي تي

194
5
القنابل الذرية (اختبار ترينيتي، هيروشيما وناغازاكي)

الحاسب الإلكتروني (إينياك، الولايات المتحدة)

تسويق أول مضاد للطفيليات العشبية (2.4ا-D)

194
7
الترانزيستور (جي باردين، و. هـ. براتان و/ و. بي. شوكلي)

التنقيب عن النفط في البحر، في عرض البحر (لويزيانا)

الطيران أسرع من الصوت (بل X-1)

1948 فرن صنع الفولاذ باستعمال الأكسجين الأساس (لينز دوناويتز)

اكتشاف أكبر حقل نفطي في العالم (سعودي الغوار)

1949 أول طائرة نفاثة للركاب (دو هافيلاند كوميت)

1950 سرعة تزايد استهلاك النفط في العالم

استمرار صب الفولاذ

انتشار المكثفات الإلكترونية

الحواسيب التجارية

التسجيل بطريقة الستيريو

آلات تسجيل بشرائط الفيديو

195 تجميع المحرك الآلي

1

بث الصور التلفزيونية الملونة

القنبلة الهيدروجينية الاندماجية

195 2 طائرة الكوميت النفاثة البريطانية تدخل الخدمة التجارية

195 3 فرن المايكروويف (شركة رايثيون للصناعات)

195 4 تدشين الغواصة النووية الأمريكية (نوتيلوس)

195 5 راديو سوني كامل الترانزيستورات

195 6 أول مفاعل نووي تجاري (كولدر هول، المملكة المتحدة)

كابل الهاتف العابر للأطلسي

بدء شق الطريق السريع العابر للولايات في الولايات المتحدة

195 7 سبوتنيك 1، أول قمر صناعي (الاتحاد السوفييتي)

أول مفاعل نووي أمريكي (شيبينغ بورت، بنسلفانيا)

1958 الدارة المدمجة (تكساس انسترمنتس)

طائرة البوينغ 707 النفاثة تدخل الخدمة

1960 أرصفة شبه مغمورة للتنقيب عن النفط في عرض البحر

أقمار صناعية لرصد الأحوال الجوية والاتصالات

ناقلات النفط الضخمة جداً

نشر الصوارخ الباليستية العابرة للقارات على نطاق واسع (ICBM)

تجارب سوفييتية في الغلاف الجوي على القنابل الاندماجية الضخمة

انتشار استعمال الأسمدة المركبة والمبيدات الحشرية

أنواع المحاصيل ذات الإنتاج العالي

1960 اختبار سلاح المينيتمان ICBM الأمريكي

1961 تدشين حاملة الطائرات النووية الأمريكية إنتربرايز

تحليق الإنسان في الفضاء (يوري غاغارين)

1962 نقل البث التلفزيوني عبر الأطلسي (تلستار)

1964 شركة الخطوط الحديدية اليابانية شينكانسن تبدأ العمل

1966 صدور الأمر ببناء طائرة بوينغ 747 الضخمة الأمريكية

1969 تحليق طائرة الكونكورد البريطانية - الفرنسية الخارقة لسرعة الصوت

البوينغ 747 تدخل الخدمة التجارية

أبولو 11 الأمريكية تهبط على سطح القمر

1970 البث الإذاعي والتلفزيوني بالقمر الصناعي

قلق بشأن توافر كميات الوقود الأحفوري

الأمطار الحامضية فوق أوروبا وأمريكا الشمالية

ارتفاع الصادرات اليابانية من السيارات ارتفاعاً كبيراً

197 أول المعالجات الميكرونية (إنتل، تكساس إنسترمنتس)

1

197
3 أوبك ترفع أسعار النفط للمرة الأولى (حتى 1974)

197
5 بدء البرازيل بإنتاج إيثينول السيارات من قصب السكر

197
6 الكونكورد تدخل الخدمة التجارية

المركبة الفضائية الأمريكية غير المأهولة فايكينغ تحط على سطح المريخ

197
7 تحليق غوسامر كوندور بالطاقة البشرية

197
9 أوبك ترفع أسعار النفط للمرة الثانية (حتى 1981)

198
0 بدء حيازة الحاسب الآلي الشخصي

سيارات وأجهزة أكثر كفاءة

قلق بشأن التغير المناخي العالمي

الشروع في دراسة الهندسة الوراثية

198
2 مشغلات أقراص سي دي (فيليبس وسوني)

198
3 القطار الفرنسي TGV يبدأ العمل (باريس - ليون)

198
5 اكتشاف ثقب الأوزون في القطب الجنوبي

198
6 كارثة المفاعل النووي في تشيرنوبيل

198
9 ابتكار الشبكة العنكبوتية العالمية (تيم بيرنرز - لي)

199
0 سكان العالم يتجاوزون 5 بلايين نسمة

199
4 تدشين نتسكيب

199
9 ارتفاع حيازة الهاتف الجوال الذكي

200
0 انتشار تركيب التوربينات الهوائية والخلايا الكهرضوئية على نطاق واسع

2000 بدء استغلال طاقة الرياح في ألمانيا

2003 إكمال سد الممرات الثلاثة (نهر يانغتسي - الصين)

2007 بدء التكسير الهيدروليكي في الولايات المتحدة

2009 الصين تصبح أكبر مستهلك للطاقة في العالم

2011 تسونامي وسوء الإدارة يتسببان في كارثة فوكوشيما النووية

عدد سكان العالم يصل إلى 7 بلايين نسمة

2014 الولايات المتحدة مرة أخرى أكبر منتجي الغاز الطبيعي

2015 معدل تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يصل إلى 400 جزيء في المتر

الاستطاعة في التاريخ

تصنيف الاستطاعة: من شمعة إلى الحضارة العالمية

أعمال، وسائط تحريك أولية، محولات	الاستطاعة (W)

شمعة صغيرة تحترق (800 ق.م.)	5
شاب مصري يدور الطنبور (لولب أرخميدس 500 ق.م.)	25
طاحونة هوائية أمريكية صغيرة تدور (1880)	30
امرأة صينية تدور آلة تذرية (100 ق.م.)	50
عمال تلميع زجاج فرنسيون يعملون باستمرار (1700)	75
رجل قوي يشغل دواسات عجلة خشبية بسرعة (1400)	200
حمار يدور مطحنة رومانية بشكل ساعة رملية (100 ق.م.)	300
زوج من الثيران المرهقة يحرثان الأرض (1900)	600
حصان إنجليزي قوي يقلب رحوية ضخمة (1770)	800
عجلة هولندية بدواسات يقوم بتشغيلها ثمانية رجال (1500)	800
حصان أمريكي قوي جداً يجر عربة (1890)	1.000
عداء مسافات طويلة في الألعاب الأوليمبية (600 ق.م.)	1.400
ناعورة رومانية شاقولية تقوم بتدوير حجر الطاحون (100 م)	1.800

محرك نيوكومن الجوي يضخ الماء (1712)	3.750
محرك سيارة رانسوم أولد كيرفد داش (1904)	5.200
سفينة يونانية فيها 50 مجدفاً تبحر بأقصى سرعتها (600 ق.م.)	6.000
طاحونة هوائية ألمانية عمودية تجرش بذور الزيت (1500)	6.500
حصان مراسلات روماني يعدو (200 ق.م.)	7.200
طاحونة هوائية ألمانية كبيرة تجفف أرضاً منخفضة (1750)	12.000
محرك فورد طراز T في أقصى سرعته (1908)	14.900
سفينة مجاديف يونانية فيها 170 مجدفاً (500 ق.م.)	20.000
محرك واط البخاري يجفف الفحم (1795)	20.000
40 حصاناً تجر حصادة - دراسة في كاليفورنيا (1885)	28.000
مجموعة من 16 طاحونة مائية رومانية في باربغل (350 ق.م.)	30.000
أول توربين مائي من طراز بنوا فورنيرون (1832)	38.000
مضخات مائية لفرساي في مارلي (1685)	60.000

محرك هوندا سيفيك جي. إل. (1985)	63.000
عنفة بخارية من نوع تشارلز بارسون (1888)	75.000
محرك بخاري في محطة إديسون في بيرل ستريت (1882)	93.200
أكبر محركات واط البخارية (1800)	100.000
استخدام الكهرباء في سوبر ماركت أمريكي (1980)	200.000
محرك ديزل لغواصة ألمانية (1916)	400.000
الليدي إيزابيلا - أكبر ناعورة في العالم (1854)	427.000
قاطرة بخارية ضخمة في أقصى سرعتها (1890)	850.000
عنفة بارسون البخارية في محطة إلبرفلت (1900)	1.000.000
أعمال شو المائية في غرينوك، اسكتلندا (1840)	1.500.000
عنفة هوائية ضخمة (2015)	4.000.000
تدشين محرك صاروخي، صاروخ V2 ا(1944)	6.200.000
عنفة غازية تغذي مضخة أنبوب نفط (1970)	10.000.000

محرك ديزل لسفينة تجارية يابانية (1960)	30.000.000
أربعة محركات نفاثة لبوينغ 747 (1969)	60.000.000
المفاعل النووي في كولدر هول (1956)	202.000.000
مولد تيربو في مفاعل تشوز النووري (1990)	1.457.000.000
انطلاق محركات الصاروخ ساترن C5 ا(1969)	2.600.000.000
المحطة النووية كاشيوازاكي - كاريوا (1997)	8.212.000.000
استهلاك الطاقة الأولية في اليابان (2015)	63.200.000.000
استهلاك أمريكا من الطاقة (الفحم والنباتات) (1850)	79.000.000.000
استهلاك الطاقة التجارية في أمريكا (2010)	3.050.000.000.000

استهلاك العالم من الطاقة التجارية (2015) 17.530.000.000.000

الاستطاعة القصوى لوسائط التحريك الأولى في العمل الميداني 1700- 2015

السنة	الأعمال، وسائط التحريك	الاستطاعة (W)
1700	فلاح صيني يعزق حقل ملفوف	50
1750	فلاح إيطالي يمهد التربة بثور عجوز ضعيف	200
1800	فلاح إنجليزي يحرث بحصانين صغيرين	1.000
1870	فلاح من داكوتا الشمالية يحرث بستة أحصنة قوية	4.000
1900	فلاح من كاليفورنيا يستخدم 32 حصاناً في جر حصادة - دراسة	22.000
1950	فلاح فرنسي يحصد بجرار صغير	50.000
2015	فلاح من مانيتوبا يحرث بجرار ديزل كبير	298.000

الاستطاعة القصوى لوسائط التحريك الأولى في النقل البري 1700-2015

السنة	الأعمال، وسائط التحريك	الاستطاعة (W)
1700	ثوران يجران عربة	700
1750	أربعة من الخيل تجر عربة ركاب	2.500

1850	قاطرة بخارية إنجليزية	200.000
1900	أسرع قاطرة بخارية أمريكية	1.000.000
1950	قاطرة ديزل ألمانية قوية	2.000.000
2006	قطار TGV الفرنسي من ألستون	9.600.000
2015	سلسلة N700 من قطارات شينكانسن السريعة	17.080.000

متوسط الاستهلاك السنوي (جيغا جول/للفرد) من الطاقة الأولية

		1750	1800	1850	1900	1950	2000
الصين	10	10	10	15ا>	20ا>	40	
بريطانيا	30	60	80	115	100	150	
فرنسا	20ا>	20	25	55	65	180	
اليابان	10	10	10	10	25	170	
أمريكا	80ا>	100ا>	105	135	245	345	
العالم		20ا>	20	25	35	40	65

ملحوظة: كل القيم مقربة إلى أقرب 5 وتشمل كل الكتلة النباتية (الوقود الحيوي الحديث والتقليدي) والوقود الأحفوري، والكهرباء الأولية.

المراجع

Abbate, J. 1999. *Inventing the Internet*. Cambridge, MA: MIT Press.

Abbott, C. G. 1932. *Great Inventions*. Washington, DC: Smithsonian Institution.

Abel, W. 1962. *Geschichte der deutschen Landwirtschaft von frühen Mittelalter bis zum 19 Jahrhundert*. Stuttgart: Ulmer.

Adam, J.-P. 1994. *Roman Building: Materials and Techniques*. London: Routledge.

Adams, R. N. 1975. *Energy and Structure: A Theory of Social Power*. Austin: University of Texas Press.

Adams, R. N. 1982. *Paradoxical Harvest: Energy and Explanation in British History, 1870-1914*. Cambridge: Cambridge University Press.

Adler, D. 2006. *Daimler & Benz: The Complete History: The Birth and Evolution of the Mercedes-Benz*. New York: Harper.

Adshead, S. A. M. 1992. *Salt and Civilization*. New York: St. Martin's Press.

Agricola, G. 1912 (1556). *De re metallica*. Trans. H. C. Hoover and L. H. Hoover. London: The Mining Magazine.

Aiello, L. C. 1996. Terrestriality, bipedalism and the origin of language. *Proceedings of the British Academy* 88:269-289.

Aiello, L. C., and J. C. K. Wells. 2002. Energetics and the evolution of the genus *Homo. Annual Review of Anthropology* 31:323-338.

Aiello, L. C., and P. Wheeler. 1995. The expensive-tissue hypothesis. .*Current Anthropology* 36:199-221

Alberici, S., et al. 2014. *Subsidies and Costs of EU Energy*. Brussels: EU Commission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ECOFYS%202014%20 .Subsidies%20and%20costs%20of%20EU%20energy_11_Nov .pdf

Aldrich, L. J. 2002. *Cyrus McCormick and the Mechanical Reaper*. :Greensboro, NC

.Morgan Reynolds

.Allan, W. 1965. *The African Husbandman*. Edinburgh: Oliver & Boyd

Allen, R. 2003. *Farm to Factory: A Reinterpretation of the Soviet .Industrial Revolution*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Allen, R. C. 2007. *How Prosperous Were the Romans? Evidence from Diocletian's Price Edict (301 AD)*. Oxford: Oxford University, .Department of Economics

Allen, R. C., et al. 2011. Wages, prices, and living standards in China, 1738-1925: In comparison with Europe, Japan, and India. .*Economic History Review* 64 (S1): 8-38

Allianz. 2010. *The Sixth Kondratieff: Long Waves of Prosperity*. Frankfurt am Main: Allianz. https://www.allianz.com/v_1339501901000/media/pres .s/document/other/ kondratieff_en.pdf

Alvard, M. S., and L. Kuznar. 2001. Deferred harvests: The transition from hunting to animal husbandry. *American Anthropologist* 103:295- .311

Amitai, R., and M. Biran, eds. 2005. *Mongols, Turks, and Others:*
.*Eurasian Nomads and the Sedentary World*. Leiden: Brill

Amontons, G. 1699. Moyen de substituer commodement l'action du
feu, à la force des hommes et des chevaux pour mouvoir les
.machines. *Mémoires de l'Académie Royale* 1699:112-126

Andersen, S. O., and K. M. Sarma. 2002. *Protecting the Ozone*
.*Layer*. London: Earthscan

Anderson, B. D. 2003. *The Physics of Sailing Explained*. Dobbs
.Ferry, NY: Sheridan House

Anderson, E. N. 1988. *The Food of China*. New Haven, CT: Yale
.University Press

Anderson, M. S. 1988. *War and Society in Europe of the Old regime,*
.*1618-1789*. New York: St. Martin's Press

Anderson, R. 1926. *The Sailing Ship: Six Thousands Years of*
.*History*. London: George Harrap

Anderson, R. C. 1962. *Oared Fighting Ships: From Classical Times*
.*to the Coming of Steam*. London: Percival Marshall

Angelo, J. E. 2003. *Space Technology*. Westport, CT: Greenwood
.Press

Anthony, D. W. 2007. *The Horse, the Wheel, and Language: How*
Bronze-Age Riders from the Eurasian Steppes Shaped the Modern
.*World*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Anthony, D., D. Y. Telegin, and D. Brown. 1991. The origin of
.horseback riding. *Scientific American* 265 (6): 94-100

Apt, J., and P. Jaramillo. 2014. Variable Renewable Energy and the
.Electricity Grid

.Washington, DC: Resources for the Future

Archer, C. I., et al. 2008. World History of Warfare. Lincoln: .University of Nebraska Press

Ardrey, L. R. 1894. American Agricultural Implements. Chicago: L. R. .Ardrey

Arellano, C. J., and R. Kram. 2014. Partitioning the metabolic cost of human running: A task-by-task approach. Integrative and .Comparative Biology 54:1084-1098

Armelagos, G. J., and K. N. Harper. 2005. Genomics at the origins of .agriculture, part one. Evolutionary Anthropology 14:68-77

.Armstrong, R. 1969. The Merchantmen. London: Ernest Benn

Army Air Forces. 1945. Army Air Forces Statistical Digest, World War II. http://www .afhra.af.mil/shared/media/document/AFD-090608-039 .pdf.

Army Technology. 2015. M1A1/2 Abrams Main Battle Tank, United .States of America. http://www.army-technology.com/projects/abrams

Ashby, T. 1935. The Aqueducts of Ancient Rome. Oxford: Oxford .University Press

Ashton, Thomas S. 1948. The Industrial Revolution, 1760-1830. .Oxford: Oxford University Press

Astill, G., and J. Langdon, eds. 1997. Medieval Farming and Technology: The Impact of Agricultural Change in Northwest Europe. .Leiden: Brill

Åström, K. J., and R. M. Murray. 2009. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton, NJ: Princeton University Press; http://www.cds.caltech ..edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09 .pdf

Atalay, S., and C. A. Hastorf. 2006. Food, meals, and daily activities: Food habitus at Neolithic Çatalhöyük. American Antiquity 71:283-.319

Atkins, S. E. 2000. Historical Encyclopedia of Atomic Energy. .Westport, CT: Greenwood Press

Atsmon, Y., and V. Dixit. 2009. Understanding China's wealthy. McKinsey Quarterly . http://www.mckinsey.com/insights/marketing_sales/u .nderstanding_chinas _wealthy

Atwater, W. O., and C. F. Langworthy. 1897. A Digest of Metabolism Experiments in Which the Balance of Income and Outgo Was .Determined. Washington, DC: U.S. GPO

Atwood, C. P. 2004. Encyclopedia of Mongolia and the Mongol .Empire. New York: Facts on File

.Atwood, R. 2009. Maya roots. Archaeology 62:18-66

.Augarten, S. 1984. Bit by Bit. Boston: Ticknor & Fields

Axelsson, E., et al. 2013. The genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet. Nature .495:360-364

Ayres, R. U. 2014. The Bubble Economy: Is Sustainable Growth .Possible? Cambridge, MA: MIT Press

Ayres, R. U., L. W. Ayres, and B. Warr. 2003. Exergy, power and .work in the UA economy, 1900-1998. Energy 28:219-273

Baars, C. 1973. De Geschiedenis van de Landbouw in de Bayerlanden. Wageningen: PUDOC (Centrum voor .(Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie

Bailey, L. H., ed. 1908. Cyclopedia of American Agriculture. New .York: Macmillan

Bailey, R. C., G. Head, M. Jenike, et al. 1989. Hunting and gathering in tropical rain forest: Is it possible? American Anthropologist 91:59-.82

Bailey, R. C., and T. N. Headland. 1991. The tropical rain forest: Is it a productive environment for human foragers? Human Ecology .19:261285

Baines, D. 1991. Emigration from Europe 1815-1930. London: .Macmillan

Bairoch, P. 1988. Cities and Economic Development: From the Dawn .of History to the Present. Chicago: University of Chicago Press

Baker, T. L. 2006. A Field Guide to America Windmills. Tempe, AZ: ACMRS (Arizona Center for Medieval and Renaissance Studies), .University of Arizona

Bald, R. 1812. A General View of the Coal Trade of Scotland, Chiefly that of the River Forth and Mid-Lothian. To Which is Added An Inquiry Into the Condition of the Women Who Carry Coals Under Ground in Scotland. Known by the Name of Bearers. Edinburgh: .Oliphant, Waugh and Innes

Baldwin, G. C. 1977. *Pyramids of the New World*. New York: G. P. .Putnam's Sons

Bamford, P. W. 1974. *Fighting Ships and Prisons: The Mediterranean Galleys of France in the Age of Louis XIV*. .Cambridge: Cambridge University Press

Bandaranayke, S. 1974. *Sinhalese Monastic Architecture*. Leiden: E. .J. Brill

Bank of Nova Scotia. 2015. Global Auto Report. .http://www.gbm.scotiabank.com/ English/bns_econ/bns_auto.pdf

Bapat, N. 2012. How Indians defied gravity and achieved success in Silicon Valley. http://www.forbes.com/sites/singularity/2012/10/15 .how-indians-defied-gravity -and-achieved-success-in-silicon-valley/

Bar-Yosef, O. 2002. The Upper Paleolithic revolution. *Annual Review .of Anthropology* 31:363-393

Bardeen, J., and W. H. Brattain. 1950. *Three-electron Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials*. US Patent 2,524,035, .October 3. Washington, DC: USPTO. http://www.uspto.gov

Barjot, D. 1991. *L'énergie aux XIXe et XXe siècles.* Paris: Presses .de l'E.N.S

Barker, A. V., and D. J. Pilbeam. 2007. *Handbook of Plant Nutrition*. .Boca Raton, FL: CRC Press

Barles, S. 2007. Feeding the city: Food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801-1914. *Science of the Total Environment* .375:48-58

Barles, S., and L. Lestel. 2007. The nitrogen question: Urbanization, industrialization, and river quality in Paris 1830-1939. *Journal of .Urban History* 33:794-812

Barnes, B. R. 2014. Behavioural change, indoor air pollution and child respiratory health in developing countries: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* .11:4607-4618

Barro, R. J. 1997. *Determinants of Economic Growth: A Cross-.Country Empirical Study*. Cambridge, MA: MIT Press

Bartosiewicz, L. et al. 1997. *Draught Cattle: Their Osteological .Identification and History*. Tervuren: Musée royal de l'Afrique central

Basalla, G. 1980. Energy and civilization. In *Science, Technology and the Human Prospect*, ed. C. Starr and P. C. Ritterbusch, 39-52.

.Oxford: Pergamon Press

Basalla, G. 1982. Some persistent energy myths. In *Energy and Transport*, ed. G. H. Daniels and M. H. Rose, 27-38. Beverley Hills, .CA: Sage

Basalla, G. 1988. *The Evolution of Technology*. Cambridge: .Cambridge University Press

Basile, S. 2014. *Cool: How Air Conditioning Changed Everything*. .New York: Fordham University Press

Basso, L. C., T. O. Basso, and S. N. Rocha. 2011. *Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and Its Impact on Yeast :Fermentation, Biofuel Production*

Recent Developments and Prospects. http://cdn.intechopen.com/pdfs/20058/InTech - Ethanol_production_in_brazil_the_industrial_proce .ss_and_its_impact_on_yeast _fermentation.pdf

Bayley, J., D. Dungworth, and S. Paynter. 2001. *Archaeometallurgy*. .London: English Heritage

Beauchamp, K. G. 1997. *Exhibiting Electricity*. London: Institution of .Electrical Engineers

Beaumont, W. W. 1902. *Motor Vehicles and Motors: Their Design, Construction and Working by Steam, Oil and Electricity*. .Westminster: Archibald Constable and Company

Beaumont, W. W. 1906. *Motor Vehicles and Motors: Their Design, Construction and Working by Steam, Oil and Electricity*. .Westminster: Archibald Constable and Co

.Beevor, A. 1998. *Stalingrad*. London: Viking

Behera, B., et al. 2015. Household collection and use of biomass .energy sources in South Asia. *Energy* 85:468-480

Bell, L. 1884. *Principles of the Manufacture of Iron and Steel*. .London: George Routledge & Sons

Bell System Memorial. 2011. Who really invented the transistor? .http://www .porticus.org/bell/belllabs_transistor1.html

Bennett, M. K. 1935. British wheat yield per acre for seven centuries. .*Economy and History* 3:12-29

Benoît, C. 1996. Le Canon de 75: Une gloire centenaire. Vincennes, .France: Service Historique de l'Armée de Terre

Benoit, F. 1940. L'usine de meunerie hydraulique de Barbegal .(Arles). *Review of Archaeology* 15:19-80

Beresford, M. W., and J. G. Hurst. 1971. *Deserted Medieval Villages*. .London: Littleworth

Berklian, Y. U., ed. 2008. *Crop Rotation*. New York: Nova Science .Publishers

Bernard, L., A. V. Gevorkyan, T. Palley, and W. Semmler. 2013. Time scales and mechanisms of economic cycles: A review of theories of long waves. Political Economy Research Institute Working Paper, .no.337, 1-21. Amherst, MA: University of Massachusetts

Bessemer, H. 1905. *Sir Henry Bessemer, F.R.S.: An Autobiography .* .London: Offices of Engineering

Bettencourt, L., and G. West. 2010. A unified theory of urban living. .*Nature* 467:912-913

Bettinger, R. L. 1991. *Hunter-Gatherers: Archaeological and* .*Evolutionary Theory*. New York: Plenum Press

Betz, A. 1926. *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch* .*Windmühlen*. Göttingen: Bandenhoeck & Ruprecht

Billington, D. P., and D. P. Billington, Jr. 2006. *Power, Speed, and Form: Engineers and the Making of the Twentieth Century*. .Princeton, NJ: Princeton University Press

bin Laden, U. 2004. Message to the American people. [http://english.aljazeera.net/ NR/exeres/79C6AF22-98FB-4A1C-](http://english.aljazeera.net/NR/exeres/79C6AF22-98FB-4A1C-B21F-2BC36E87F61F.htm) .B21F-2BC36E87F61F.htm

Bird-David, N. 1992. Beyond "The Original Affluent Society." *Current* .*Anthropology* 33:25-47

Biringuccio, V. 1959 (1540). *De la pirotechnia [The pirotechnia]*. .Trans. C. S. Smith and M. T. Gnudi. New York: Basic Books

Bishop, C. 2014. *The Illustrated Encyclopedia of Weapons of World War I: The Comprehensive Guide to Weapons Systems, Including* .*Tanks, Small Arms, Warplanes, Artillery*. London: Amber

Blériot, L. 2015. *Blériot: Flight into the XXth Century*. London: Austin .Macauley

Blumenschine, R. J., and J. A. Cavallo. 1992. Scavenging and .human evolution. *Scientific American* 267 (4): 90-95

Blumer, H. 1990. *Industrialization as an Agent of Social Change*. .New York: Aldine de Gruyter

Blyth, R. J., A. Lambert, and J. Ruger, eds. 2011. *The Dreadnought* .*and the Edwardian Age*. Farnham: Ashgate

Boden, T., and B. Andres. 2015. *Global CO_2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2011*. Oak Ridge, TN: CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), Oak Ridge National Laboratory. [http://cdiac.ornl.gov/ trends/emis/tre_glob_2011.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2011.html).

Boden. T., B. Andres, and G. Marland. 2016. Global CO_2 emissions from fossil fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751-

.2013. http://cdiac.ornl.gov/ ftp/ndp030/global.1751_2013.ems

.Boeing. 2015. Boeing history. http://www.boeing.com/history

Bogin, B. 2011. Kung nutritional status and the original "affluent .society": A new analysis. *Anthropologischer Anzeiger* 68:349-366

Bono, P., and C. Boni. 1996. Water supply of Rome in antiquity and .today. *Environmental Geology* 27:126-134

Boonenburg, K. 1952. *Windmills in Holland*. The Hague: Netherlands .Government Information Service

Borghese, A., ed. 2005. *Buffalo Production and Research*. Rome: .FAO

Bos, M. G. 2009. *Water Requirements for Irrigation and the* .*Environment*. Dordrecht: Springer

Bose, S., ed. 1991. *Shifting Agriculture in India*. Calcutta: .Anthropological Survey of India

Boserup, E. 1965. *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*. Chicago: .Aldine

Boserup, E. 1976. Environment, population, and technology in .primitive societies. *Population and Development Review* 2:21-36

Bott, R. D. 2004. *Evolution of Canada's Oil and Gas Industry*. .Calgary, AB: Canadian Centre for Energy Information

Boulding, K. E. 1974. The social system and the energy crisis. .*Science* 184:255-257

Bowers, B. 1998. *Lengthening the Day: A History of Lighting* .*Technology*. Oxford: Oxford University Press

Bowers, B. 2001. *Sir Charles Wheatstone: 1802-1875*, 2nd ed. .London: Institution of Engineering and Technology

Boxer, C. R. 1969. *The Portuguese Seaborne Empire 1415-1825*. .London: Hutchinson

BP (British Petroleum). 2016. *Statistical Review of World Energy 2016*. https://www .bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statis tical-review-2015/bp -statistical-review-of-world-energy-2015-full-repo .rt.pdf

Bramanti, B., et al. 2009. Genetic discontinuity between local hunter-.gatherers and Central Europe’s first farmers. *Science* 326:137-140

Bramble, D. M., and D. E. Lieberman. 2004. Endurance running and .the evolution of *Homo. Nature* 432:345-352

Brandstetter, T. 2005. "The most wonderful piece of machinery the world can boast of": The water-works at Marly, 1680-1830. *History .and Technology* 21:205-220

Brantly, J. E. 1971. *History of Oil Well Drilling*. Houston, TX: Gulf .Publishing

.Braudel, F. 1982. *On History*. Chicago: University of Chicago Press

Braun, D. R., et al. 2010. Early hominin diet included diverse terrestrial and aquatic animals 1.95 Ma in East Turkana, Kenya. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United .States of America* 107:10002-10007

Braun, G. W., and D. R. Smith. 1992. Commercial wind power: Recent experience in the United States. *Annual Review of Energy .and the Environment* 17:97-121

Bray, F. 1984. *Science and Civilisation in China*. Vol. 6, Part II. .*Agriculture*. Cambridge: Cambridge University Press

Bresse, M. 1876. *Water-Wheels or Hydraulic Motors*. New York: .John Wiley

Brodhead, M. J. 2012. *The Panama Canal: Writings of the U. S. Army Corps of Engineers Officers Who Conceived and Built It*. .Alexandria, VA: U.S. Army Corps of Engineers History Office

.Brody, S. 1945. *Bioenergetics and Growth*. New York: Reinhold

Bronson, B. 1977. The earliest farming: Demography as cause and consequence. In *Origins of Agriculture ,* ed. C. Reed, 23-48. The .Hague: Mouton

Brooks, D. R., and E. O. Wiley. 1986. *Evolution as Entropy*. Chicago: .University of Chicago Press

Brown, G. I. 1999. *Count Rumford: The Extraordinary Life of a* .*Scientific Genius*. Stroud: Sutton Publishing

Brown, K. S., et al. 2009. Fire as an engineering tool of early modern .humans. *Science* 325:859-862

Brown, K. S., et al. 2012. An early and enduring advanced technology originating 71,000 years ago in South Africa. *Nature* .491:590-593

Brown, S., P. Schroeder, and R. Birdsey. 1997. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development. *Forest Ecology* .*and Management* 96:31-47

Bruce, A. W. 1952. *The Steam Locomotive in America*. New York: .Norton

Brunck, R. F. P. 1776. *Analecta Veterum Poetarum Graecorum*. .Strasbourg: I. G. Bauer & Socium

Bruni, L., and P. L. Porta. 2006. *Economics and Happiness*. New .York: Oxford University Press

Brunner, K. 1995. Continuity and discontinuity of Roman agricultural knowledge in the early Middle Ages. In *Agriculture in the Middle Ages*, ed. D. Sweeney, 21-39. Philadelphia: University of .Pennsylvania Press

Brunt, L. 1999. *Estimating English Wheat Production in the Industrial Revolution*. Oxford: University of Oxford. .http://www.nuffield.ox.ac.uk/economics/history/ paper35/dp35a4.pdf

Buchanan, B. J., ed. 2006. *Gunpowder, Explosives and the State: A .Technological History*. Aldershot: Ashgate

Buck, J. L. 1930. *Chinese Farm Economy*. Nanking: University of .Nanking

Buck, J. L. 1937. *Land Utilization in China*. Nanking: University of .Nanking

Buckley, T. A. 1855. *The Works of Horace*. New York: Harper & .Brothers

Budge, E. A. W. 1920. *An Egyptian Hieroglyphic Dictionary*. London: .John Murray

Bulliet, R. W. 1975. *The Camel and the Wheel*. Cambridge, MA: .Harvard University Press

Bulliet, R. W. 2016. *The Wheel: Inventions and Reinventions*. New .York: Columbia University Press

Bunch, B. H., and A. Hellemans. 1993. *The Timetables of Technology: A Chronology of the Most Important People and Events .in the History of Technology*. New York: Simon & Schuster

Burke, E., III. 2009. Human history, energy regimes and the environment. In *The Environment and World History*, ed. E. Burke III

.and K. Pomeranz, 33-53. Berkeley: University of California Press

Burstall, A. F. 1968. *Simple Working Models of Historic Machines*. .Cambridge, MA: MIT Press

.Burton, R. F. 1880. *The Lusiads*. London: Tinsley Brothers

Butler, J. H., and S. A. Montzka. 2015. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index. Boulder, CO: NOAA. .http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html

Butzer, K. W. 1976. *Early Hydraulic Civilization in Egypt*. Chicago: .University of Chicago Press

Butzer, K. W. 1984. Long-term Nile flood variation and political discontinuities in

Pharaonic Egypt. In *From Hunters to Farmers*, ed. J. D. Clark and S. .A. Brandt, 102- 112. Berkeley: University of California Press

Byrn, E. W. 1900. *The Progress of Invention in the Nineteenth* .*Century*. New York: Munn & Co

Caidin, M. 1960. *A Torch to the Enemy: The Fire Raid on Tokyo*. .New York: Balantine Books

Cairns, M. F., ed. 2015. *Shifting Cultivation and Environmental Change: Indigenous People, Agriculture and Forest Conservation*. .London: Earthscan Routledge

Cameron, R. 1982. The Industrial Revolution: A misnomer. *History* .*Teacher* 15 (3): 377-384

Cameron, R. 1985. A new view of European industrialization. .*Economic History Review* 3:1-23

Campbell, B. M. S., and M. Overton. 1993. A new perspective on medieval and early modern agriculture: Six centuries of Norfolk .farming, *c.* 1250-*c*. 1850. *Past & Present* 141 (1): 38-105

Campbell, H. R. 1907. *The Manufacture and Properties of Iron and* .*Steel*. New York: Hill Publishing

Cantelon, P. L., R. G. Hewlett, and R. C. Williams, eds. 1991. *The American Atom: A Documentary History of Nuclear Policies from the Discovery of Fission to the Present*. Philadelphia: University of .Pennsylvania Press

Capulli, M. 2003. *Le Navi della Serenissima: La Galea Veneziana di* .*Lazise*. Venezia: Marsilio Editore

Cardwell, D. S. L. 1971. From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age. Ithaca, NY: Cornell .University Press

Caro, R. A. 1982. The Years of Lyndon Johnson: The Path to Power. .New York: Knopf

Caron, F. 2013. Dynamics of Innovation: The Expansion of .Technology in Modern Times. New York: Berghahn

Carrier, D. R. 1984. The energetic paradox of human running and .hominid evolution. Current Anthropology 25:483-495

Carter, R. A. 2000. Buffalo Bill Cody: The Man behind the Legend. .New York: John Wiley

Carter, W. E. 1969. New Lands and Old Traditions: Kekchi Cultivators in the Guatemala Lowlands. Gainesville: University of .Florida Press

Casson, L. 1994. Ships and Seafaring in Ancient Times. Austin: .University of Texas Press

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2015. Overweight & Obesity. http://www.cdc.gov/nchs/fastats/obesity-overweight .htm.

CDFA (Clean Diesel Fuel Alliance). 2015. Ultra Low Sulfur Diesel .(ULSD). http:// www.clean-diesel.org/index.htm

Centre des Recherches Historiques. 1965. Villages Desertes et .Histoire Economique. Paris: SEVPEN

Ceruzzi, P. E. 2003. A History of Modern Computing. Cambridge, .MA: MIT Press

CFM International. 2015. Discover CFM. http://www.cfmaeroengines.com/files/ .brochures/Brochure_CFM_2015.pdf

Chandler, T. 1987. Four Thousand Years of Urban Growth: An .Historical Census. Lewiston, NY: Edwin Mellen Press

Chapelle, H. I. 1988. The History of American Sailing Ships. .Modesto, CA: Bonanza Books

Charette, R. N. 2009. This car runs on code. IEEE Spectrum 2009 (February). http:// spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/this-ca .r-runs-on-code/0

Charles, C., and P. Wooders. 2011. Subsidies to Liquid Transport .Fuels: A comparative review of estimates. Geneva: IISD

Chartrand, R. 2003. Napoleon's Guns 1792-1815. Botley. Osprey .Publishing

Chase, K. 2003. Firearms: A Global History to 1700. Cambridge: .Cambridge University Press

Chatterton, E. K. 1914. Sailing Ships: The Story of Their Development from the Earliest Times to the Present Day. London: .Sidgwick & Jackson

.Chatterton, E. K. 1926. The Ship Under Sail. London: Fisher Unwin

Chauvois, L. 1967. Histoire merveilleuse de Zénobe Gramme. Paris: .Albert Blanchard

Cheney, Margaret. 1981. Tesla: Man out of Time. New York: Dorset .Press

Chevedden, P. E., et al. 1995. The trebuchet. Scientific American .273 (1): 66-71

China Energy Group. 2014. Key China Energy Statistics 2014. .Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory

Chincold. 2015. Three Gorges Project. http://www.chincold.org.cn/dams/rootfiles/ .2010/07/20/1279253974143251-1279253974145520.pdf

Ching, F. D. K., M. Jarzombek, and V. Prakash. 2011. *A Global* .*History of Architecture*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons

Chorley, G. P. H. 1981. The agricultural revolution in Northern Europe, 1750-1880: Nitrogen, legumes, and crop productivity. .*Economic History Review* 34 (1):71-93

Choudhury, P. C. 1976. *Hastividyarnava*. Gauhati: Publication Board .of Assam

Christ, K. 1984. *The Romans*. Berkeley: University of California .Press

Church, R., Hall, A. and J. Kanefsky. 1986. *History of the British Coal Industry*. Vol. 3, *Victorian Pre-Eminence*. Oxford: Oxford University .Press

Cipolla, C. M. 1965. *Guns, Sails and Empires: Technological Innovation and the Early Phases of European Expansion, 1400-* .*1700*. New York: Pantheon Books

City Population. 2015. Major agglomerations of the world. .http://www.citypopulation.de/world/Agglomerations.html

Clapham, J. H. 1926. *An Economic History of Modern Britain*. .Cambridge: Cambridge University Press

Clark, C., and M. Haswell. 1970. *The Economics of Subsistence .Agriculture*. London: Macmillan

Clark, G. 1987. Productivity growth without technical change in European agriculture before 1850. *Journal of Economic History* .47:419-432

Clark, G. 1991. Yields per acre in English agriculture, 1250-1850: .Evidence from labour inputs. *Economic History Review* 44:445-460

Clark, G., M. Huberman, and P. H. Lindert. 1995. A British food .puzzle, 1770-1850. *Economic History Review* 48:215-237

Clarke, R., and M. Dubravko. 1983. *Soviet Economic Facts, 1917-.1981*. London: Palgrave Macmillan

Clarkson, L. A. 1985. *Proto-Industrialization: The First Phase of .Industrialization?* London: Macmillan

Clavering, E. 1995. The coal mills of Northeast England: The use of waterwheels for draining coal mines, 1600-1750. *Technology and .Culture* 36:211-241

Clerk, D. 1909. *The Gas, Petrol, and Oil Engine*. London: Longmans, .Green and Co

Cleveland, C. J., ed. 2004. *Encyclopedia of Energy,* 6 vols. .Amsterdam: Elsevier

Cleveland, C. J., and C. Morris. 2014. *Handbook of Energy*. Vol. 2, *Chronologies, Top Ten Lists, and World Clouds*. Amsterdam: .Elsevier

CMI (Center for Military History). 2010. *War in the Persian Gulf: Operations Desert Shield and Desert Storm*, August 1990-March

1991. http://www.history.army.mil/ html/books/070/70-117-1/cmh_70-
.117-1.pdf

Coates, J. F. 1989. The trireme sails again. *Scientific American* 261
.(4): 68-75

Cobbett, J. P. 1824. *A Ride of Eight Hundred Miles in France*.
.London: Charles Clement

Cochrane, W. W. 1993. *The Development of American Agriculture: A*
.*Historical Analysis*. Minneapolis: University of Minnesota Press

Cockrill, W. R., ed. 1974. *The Husbandry and Health of the Domestic*
.*Buffalo*. Rome: FAO

Cohen, B. 1990. *Benjamin Franklin's Science*. Cambridge, MA:
.Harvard University Press

Cohen, N. M. 1977. *The Food Crisis in Prehistory*. New Haven, CT:
.Yale University Press

.Collier, B. 1962. *The Battle of Britain*. London: Batsford

Collins, E. V., and A. B. Caine. 1926. *Testing Draft Horses*. *Iowa*
.*Experimental Station Bulletin* 240

Coltman, J. W. 1988. The transformer. *Scientific American* 258 (1):
.86-95

Committee for the Compilation of Materials on Damage Caused by
the Atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. 1991. *Hiroshima and*
Nagasaki: The Physical, Medical and Social Effects of the Atomic
.*Bombing*. New York: Basic Books

.Conklin, H. C. 1957. *Hanunoo Agriculture*. Rome: FAO

Conquest, Robert. 2007. *The Great Terror: A Reassessment*. 40th
.Anniversary Edition. Oxford: Oxford University Press

Constable, G., and B. Somerville. 2003. *A Century of Innovation*. .Washington, DC: Joseph Henry Press

Constant, E. W. 1981. *The Origins of Turbojet Revolution*. Baltimore, .MD: Johns Hopkins University Press

Coomes, O. T., F. Grimard, and G. J. Burt. 2000. Tropical forests and shifting cultivation: Secondary forest fallow dynamics among traditional farmers of the Peruvian Amazon. *Ecological Economics* .32:109-124

Coopersmith, J. 2010. *Energy, the Subtle Concept: The Discovery of Feynman's Blocks from Leibniz to Einstein*. Oxford: Oxford .University Press

Copley, Frank B. 1923. *Frederick W. Taylor: Father of Scientific .Management*. New York: Harper & Brothers

Cornways. 2015. Combine. .http://www.cornways.de/hi_combine.html

Cotterell, B., and J. Kamminga. 1990. *Machines of Pre-industrial .Technology*. Cambridge: Cambridge University Press

Coulomb, C. A. 1799. Résultat de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier. … *Mémoires de l'Institut national des sciences .et arts—Sciences mathématiques et physique* 2:380-428

Coulton, J. J. 1977. *Ancient Greek Architects at Work*. Ithaca, NY: .Cornell University Press

Cowan, R. 1990. Nuclear power reactors: A study in technological .lock-in. *Journal of Economic History* 50:541-567

Craddock, P. T. 1995. *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh: .Edinburgh University Press

Crafts, N. F. R., and C. K. Harley. 1992. Output growth and the .British Industrial Revolution. *Economic History Review* 45:703-730

Crafts, N., and T. Mills. 2004. Was 19th century British growth steam-powered? The climacteric revisited. *Explorations in Economic .History* 41:156-171

.Croil, J. 1898. *Steam Navigation*. Toronto: William Briggs

Crossley, D. 1990. *Post-medieval Archaeology in Britain*. Leicester: .Leicester University Press

Cummins, C. L. 1989. *Internal Fire*. Warrendale, PA: Society of .Automotive Engineers

Cumpsty, N. 2006. *Jet Propulsion*. Cambridge: Cambridge University .Press

Cuomo, S. 2004. The sinews of war: Ancient catapults. *Science* .303:771-772

.Curtis, W. H. 1919. *Wood Ship Construction*. New York: McGraw-Hill

Daggett, S. 2010. *Costs of Major U.S. Wars*. Washington, DC: Congressional Research Service. http://cironline.org/sites/default/files/legacy/fi .les/June2010CRScostofuswars .pdf

.Dalby, W. E. 1920. *Steam Power*. London: Edward Arnold

Darby, H. C. 1956. The clearing of the woodland of Europe. In *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, ed. W. L. Thomas, 183-216. .Chicago: University of Chicago Press

.Darling, K. 2004. *Concorde*. Marlborough: Crowood Press

Daugherty, C. R. 1927. The development of horse-power equipment in the United States. In *Power Capacity and Production in the United .States*, ed. C. R. Daugherty, A. H

Horton and R. W. Davenport, 5-112. Washington, DC: U.S. .Geological Survey

Daumas, M., ed. 1969. *A History of Technology and Invention*. New .York: Crown Publishers

David, P. 1985. Clio and the economics of QWERTY. *American .Economic Review* 75:332-337

David, P. A. 1991. The hero and the herd in technological history: Reflections on Thomas Edison and the Battle of the Systems. In *Favorites of Fortune: Technology, Growth and Economic Development since the Industrial Revolution*, ed. P. Higonett, D. S. Landes and H. Rosovsky, 72-119. Cambridge, MA: Harvard .University Press

Davids, K. 2006. River control and the evolution of knowledge: A comparison between regions in China and Europe, c. 1400-1850. .*Journal of Global History* 1:59-79

Davies, N. 1987. *The Aztec Empire: The Toltec Resurgence*. .Norman: University of Oklahoma Press

.Davis, M. 2001. *Late Victorian Holocausts*. New York: Verso

de Beaune, S. A., and R. White. 1993. Ice age lamps. *Scientific .American* 266 (3): 108-113

de la Torre, I. 2011. The origins of stone tool technology in Africa: A historical perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 366 (1567): 1028-.1037

De Zeeuw, J. W. 1978. Peat and the Dutch Golden Age: The .historical meaning of energy-attainability. *A.A.G. Bijdragen* 21:3-31

Deffeyes, K. S. 2001. *Hubbert's Peak: The Impending World Oil .Shortage*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Demarest, A. 2004. *Ancient Maya: The Rise and Fall of a Rainforest .Civilization*. Cambridge: Cambridge University Press

Dempsey, P. 2015. Notes on the Liberty aircraft engine. .http://www.enginehistory. org/Before1925/Liberty/LibertyNotes.shtml

Denevan, W. H. 1982. Hydraulic agriculture in the American tropics: Forms, measures, and recent research. In *Maya Subsistence*, ed. K. .V. Flannery, 181-203. New York: Academic Press

Denny, M. 2004. The efficiency of overshot and undershot .waterwheels. *European Journal of Physics* 25:193-202

Denny, M. 2007. *Ingenium: Five Machines That Changed the World*. .Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press

.Dent, A. 1974. *The Horse*. New York: Holt, Rinehart and Winston

Department of Energy & Climate Change, UK Government. 2015. Historical coal data: Coal production, availability and consumption 1853 to 2014. https://www .gov.uk/government/statistical-data-sets/historica l-coal-data-coal-production -availability-and-consumption-1853-to-.2011

Derry, T. K., and T. I. Williams. 1960. *A Short History of Technology*. .Oxford: Oxford University Press

Diamond, J. 2011. *Collapse: How Societies Choose to Fail or .Succeed*. New York: Penguin Books

.Dickens, C. 1854. *Hard Times*. London: Bradbury & Evans

Dickey, P. A. 1959. The first oil well. *Journal of Petroleum .Technology* 59:14-25

Dickinson, H. W. 1939. *A Short History of the Steam Engine*. .Cambridge: Cambridge University Press

Dickinson, H. W., and R. Jenkins. 1927. *James Watt and the Steam* .*Engine*. Oxford: Oxford University Press

Diderot, D., and J.L.R. D'Alembert. 1769-1772. *L'Encyclopedie ou dictionnaire raisonne des sciences des arts et des métiers*. Paris: .Avec approbation et privilege du roy

Dieffenbach, E. M., and R. B. Gray. 1960. The development of the tractor. In *Power to Produce: 1960 Yearbook of Agriculture* , 24-45. .Washington, DC: U.S. Department of Agriculture

Dien, A. 2000. The stirrup and its effect on Chinese military history. .http://www .silk-road.com/artl/stirrup.shtml

Diener, E., E. Suh, and S. Oishi. 1997. Recent findings on subjective .well-being. *Indian Journal of Clinical Psychology* 24:25-41

Diesel, E. 1937. *Diesel: Der Mensch, das Werk, das Schicksal*. .Hamburg: Hanseatische Verlagsanstalt

Diesel, R. 1893a. Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen. https://www.dhm.de/lemo/bestand/objekt/patentschri .ft-von-rudolf-diesel -1893.html

Diesel, R. 1893b. *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute* .*bekannten Verbrennungsmotoren*. Berlin: Julius Springer

Diesel, R. 1903. *Solidarismus: Natürliche wirtschaftliche Erlösung* .(*des Menschen*. Munich (repr., Augsburg: Maro Verlag, 2007

Diesel, R. 1913. *Die Entstehung des Dieselmotors*. Berlin: Julius .Springer

Dikötter, F. 2010. *Mao's Great Famine: The History of China's Most* .*Devastating Catastrophe, 1958-1962*. London: Walker Books

DK Publishing. 2012. *Military History: The Definitive Visual Guide to* .*the Objects of Warfare*. New York: DK Publishing

Domínguez-Rodrigo, M. 2002. Hunting and scavenging by early humans: The state of the debate. *Journal of World Prehistory* 16:1- .54

Donnelly, J. S. 2005. *The Great Irish Potato Famine*. Stroud: Sutton .Publishing

.Doorenbos, J., et al. 1979. *Yield Response to Water*. Rome: FAO

Dowson, D. 1973. Tribology before Columbus. *Mechanical* .*Engineering* 95 (4): 12-20

Doyle, J., B. Francis, and A. Tannenbaum. 1990. *Feedback Control* .*Theory*. London: Macmillan

Drews, R. 2004. *Early Riders: The Beginnings of Mounted Warfare* .*in Asia and Europe*. New York: Routledge

Duby, G. 1968. *Rural Economy and Country Life in the Medieval* .*West*. London: Edward Arnold

Duby, G. 1998. *Rural Economy and Country Life in the Medieval* .*West*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press

Dukes, J. S. 2003. Burning buried sunshine: Human consumption of .ancient solar energy. *Climatic Change* 61:31-44

Duncan-Jones, R. 1990. *Structure and Scale in the Roman* .*Economy*. Cambridge: Cambridge University Press

Dunsheath, P. 1962. *A History of Electrical Industry*. London: Faber .and Faber

Dupont, B., D. Keeling, and T. Weiss. 2012. Passenger fares for overseas travel in the 19th and 20th centuries. Paper presented at the Annual Meeting of the Economic History Association, Vancouver,

BC, September 21-23. http://eh.net/eha/wp - .content/uploads/2013/11/Weissetal.pdf

Dyer, Frank L., and Thomas C. Martin. 1929. *Edison: His Life and* .*Inventions*. New York: Harper & Brothers

Eagar, T. W., and C. Musso. 2001. Why did the World Trade Center collapse? Science, engineering, and speculation. *JOM* 53:8-11. .http://www.tms.org/pubs/ journals/JOM/0112/Eagar/Eagar-0112.html

Earl, D. 1973. *Charcoal and Forest Management*. Oxford: Oxford .University Press

Eavenson, H. N. 1942. *The First Century and a Quarter of American* .*Coal Industry.* Pittsburgh, PA: Privately printed

Eckermann, E. 2001. *World History of the Automobile*. Warrendale, .PA: SAE Press

ECRI (Economic Cycle Research Institute). 2015. Economic cycles. .https://www .businesscycle.com

.Eden, F. M. 1797. *The State of the Poor*. London: J. Davis

Edison, T. A. 1880. Electric Light. Specification forming part of Letters Patent No. 227,229, dated May 4, 1880. Washington, DC: .U.S. Patent Office. http://www.uspto .gov

Edison, T. A. 1889. The dangers of electric lighting. *North American* .*Review* 149:625-634

Edgerton, D. 2007. *The Shock of the Old: Technology and Global* .*History since 1900*. Oxford: Oxford University Press

Edgerton, S. Y. 1961. Heat and style: Eighteenth-century house warming by stoves. *The Journal of the Society of Architectural* .*Historians* 20:20-26

Edwards, J. F. 2003. Building the Great Pyramid: Probable construction methods employed at Giza. *Technology and Culture* .44:340-354

.Egerton, W. 1896. *Indian and Oriental Armour*. London: W. H. Allen

Egg, E., et al. 1971. *Guns*. Greenwich, CT: New York Graphic .Society

Electricity Council. 1973. *Electricity Supply in Great Britain: A Chronology—From the Beginnings of the Industry to 31 December* .*1972*. London: Electricity Council

Elliott, D. 2013. *Fukushima: Impacts and Implications*. Houndmills: .Palgrave Macmillan

.Ellis, C. H. 1983. *The Lore of the Train*. New York: Crescent Books

Ellison, R. 1981. Diet in Mesopotamia: The evidence of the barley .ration texts. *Iraq* 45:35-45

Ellul, J. 1954. *La Technique ou l'enjeu du siècle*. Paris: Armand .Colin

Elphick, P. 2001. *Liberty: The Ships That Won the War*. Annapolis, .MD: Naval Institute Press

Elton, A. 1958. Gas for light and heat. In *A History of Technology*, .vol. 4, ed. C. Singer et al., 258-275. Oxford: Oxford University Press

Engels, F. 1845. *Die Lage der arbeitenden Klasse in England*. .Leipzig: Otto Wigand

Erdkamp, P. 2005. The Grain Market in the Roman Empire: A Social, Political and Economic Study. Cambridge: Cambridge University .Press

Erickson, C. L. 1988. Raised field agriculture in the Lake Titicaca .Basin. Expedition 30 (1): 8-16

Erlande-Brandenburg, A. 1994. The Cathedral: The Social and Architectural Dynamics of Construction. Cambridge: Cambridge .University Press

Esmay, M. L., and C. W. Hall, eds. 1968. Agricultural Mechanization .in Developing Countries. Tokyo: Shin-Norinsha

Evangelou, P. 1984. Livestock Development in Kenya's Maasailand. .Boulder, CO: Westview Press

Evans, O. 1795. The Young Millwright and Miller's Guide. .Philadelphia: O. Evans

.Evelyn, J. 1607. Silva. London: R. Scott

Ewbank, T. 1870. A Descriptive and Historical Account of Hydraulic .and Other Machines for Raising Water. New York: Scribner

Executive Office of the President. 2013. Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resilience to Weather Outages. Washington, .DC: The White House

Fairlie, S. 2011. Notes on the history of the scythe and its .manufacture. http:// scytheassociation.org/history

Faith, J. T. 2007. Eland, buffalo, and wild pigs: Were Middle Stone Age humans ineffective hunters? Journal of Human Evolution 55:24-.36

Falkenstein, A. 1939. Zehnter vorläufiger Bericht über die von der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft in Uruk-Warka unternommen Ausgrabungen. Berlin: Verlag Akademie der .Wissenschaften

Falkus, M. E. 1972. The Industrialization of Russia, 1700-1914. .London: Macmillan

Fant, K. 2014. Alfred Nobel: A Biography. New York: Arcade .Publishing

FAO (Food and Agriculture Organization). 2004. Human Energy Requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Consultation. .Rome: FAO

.FAO. 2015a. FAOSTAT. http://faostat3.fao.org/home/E

FAO. 2015b. The state of food insecurity in the world 2015. .http://www.fao.org/ hunger/key-messages/en

Faraday, M. 1832. Experimental researches in electricity. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 122:125-.162

Farey, J. 1827. A Treatise on the Steam Engine. London: Longman, .Rees, Orme, Brown and Green

Faulseit, R. K., ed. 2015. Beyond Collapse: Archaeological Perspectives on Resilience, Revitalization, and Transformation in Complex Societies. Carbondale, IL: Southern Illinois University .Press

Federico, G. 2008. Feeding the World: An Economic History of .Agriculture, 1800-2000. Princeton, NJ: Princeton University Press

Ferguson, E. F. 1971. The measurement of the "man-day." Scientific .American 225 (4): 96-103

Fernández-Armesto, F. 1988. The Spanish Armada: The Experience .of War in 1588. New York: Oxford University Press

Feuerbach, A. 2006. Crucible Damascus steel: A fascination for .almost 2,000 years. Journal of Metals (May): 48-50

Feugang, J. M., P. Konarski, D. Zou, F. C. Stintzing, and C. Zou. 2006. Nutritional and medicinal use of cactus pear (Opuntia spp.) .cladodes and fruits. Frontiers in Bioscience 11:2574-2589

Feynman, R. 1988. The Feynman Lectures on Physics. Redwood .City, CA: Addison-Wesley

Fiedel, S., and G. Haynes. 2004. A premature burial: Comments on Grayson and Meltzer's "Requiem for overkill." Journal of .Archaeological Science 31:121-131

Figuier, L. 1888. Les nouvelles conquêtes de la science: L'électricité. .Paris: Manpir Flammarion

Finley, M. I. 1959. Was Greek civilization based on slave labour? .Historia. Einzelschriften 1959:145-164

Finley, M. I. 1965. Technical innovation and economic progress in .the ancient world. Economic History Review 18:29-45

Finniston, M. et al. 1992. Oxford Illustrated Encyclopedia of Invention .and Technology. Oxford: Oxford University Press

Fish, J. L., and C. A. Lockwood. 2003. Dietary constraints on encephalization in primates. American Journal of Physical .Anthropology 120:171-181

Fitchen, J. 1961. The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of .Medieval Vault Erection. Chicago: University of Chicago Press

Fitzhugh, B., and J. Habu, eds. 2002. Beyond Foraging and Collecting: Evolutionary Change in Hunter-Gatherer Settlement .Systems. Berlin: Springer

Flannery. K.V., ed. 1982. Maya Subsistence. New York: Academic .Press

.Flink, J. J. 1988. The Automobile Age. Cambridge, MA: MIT Press

Flinn, M. W. et al. 1984-1993. History of the British Coal Industry, 5 .vols. Oxford: Oxford University Press

Flower, R., and M. W. Jones. 1981. 100 Years of Motoring: An RAC .Social History of Car. Maidenhead: McGraw-Hill

Fluck, R. C., ed. 1992. Energy in Farm Production. Amsterdam: .Elsevier

Fogel, R. W. 1991. The conquest of high mortality and hunger in Europe and America: Timing and mechanisms. In Favorites of Fortune, ed. P. Higgonet et al., 33-71. Cambridge, MA: Harvard .University Press

Foley, R. A., and P. C. Lee. 1991. Ecology and energetics of encephalization in hominid evolution. *Philosophical Transactions of .the Royal Society of London* 334:223-232

Fontana, D. 1590. Della trasportatione dell'obelisco Vaticano et delle fabriche di nostro signore Papa Sisto V. Roma: Domenico Basa. .http://www.rarebookroom.org/ Control/ftaobc/index.html

Forbes, R. J. 1958. Power to 1850. In *A History of Technology*, vol. .4, ed. C. Singer et al., 148-167. Oxford: Oxford University Press

Forbes, R. J. 1964-1972. *Studies in Ancient Technology*. 9 volumes. .Leiden: E. J. Brill

Forbes, R. J. 1964. Bitumen and petroleum in antiquity. In *Studies in .Ancient Technology*. vol. 1, 1-124. Leiden: E. J. Brill

Forbes, R. J. 1965. *Studies in Ancient Technology*, vol. 2. Leiden: E. .J. Brill

Forbes, R. J. 1966. Heat and heating. In *Studies in Ancient .Technology*, vol. 6, 1-103. Leiden: E. J. Brill

Forbes, R. 1972. Copper. In *Studies in Ancient Technology*, vol. 6, 1- :133. Leiden

.E. J. Brill

Forbes. 2015. The world's biggest public companies. .http://www.forbes.com/ global2000/list/#tab:overall

Fores, M. 1981. The Myth of a British Industrial Revolution. *History* .66:181-198

Foster, D. R., and J. D. Aber. 2004. *Forests in Time: The Environmental Consequences of 1,000 Years of Change in New* .*England*. New Haven, CT: Yale University Press

Foster, N., and L. D. Cordell. 1992. *Chilies to Chocolate: Food the* .*Americas Gave the World*. Tucson: University of Arizona Press

Fouquet, R. 2008. *Heat, Power and Light: Revolutions in Energy* .*Services*. London: Edward Elgar

Fouquet, R. 2010. The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy* .38:6586-6596

Fouquet, R., and P. J. G. Pearson. 2006. Seven centuries of energy services: The price and use of light in the United Kingdom (1300-.2000). *Energy Journal* 27:139-177

Fox, R. F. 1988. *Energy and the Evolution of Life*. San Francisco: W. .H. Freeman

Francis, D. 1990. *The Great Chase: A History of World Whaling*. .Toronto: Penguin Books

Frankenfield, D. C., E. R. Muth, and W. A. Rowe. 1998. The Harris-Benedict studies of human basal metabolism: History and limitations. .*Journal of the American Dietetic Association* 98:439-445

FRED (Federal Reserve Economic Data). 2015. Real gross domestic product per capita. https://research.stlouisfed.org/fred2/series/A939R.X0Q048SBEA

Freedman, B. 2014. *Global Environmental Change*. Amsterdam: .Springer Netherlands

Freedom House. 2015. Freedom in the world 2015. https://freedomhouse.org/report/ freedom-world/freedom-world-.2015#.Vfcs74dRGM8

Freese, S. 1957. *Windmills and Millwrighting*. Cambridge: .Cambridge University Press

French, J. C., and C. Collins. 2015. Upper Palaeolithic population histories of southwestern France: A comparison of the demographic signatures of ^{14}C date distributions and archaeological site counts. .*Journal of Archaeological Science* 55:122-134

Friedel, R., and P. Israel. 1986. *Edison's Electric Light*. New .Brunswick, NJ: Rutgers University Press

Friedman, H. B. 1992. DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane): A .chemist's tale. *Journal of Chemical Education* 69:362-365

Frison, G. C. 1987. Prehistoric hunting strategies. In *The Evolution of Human Hunting*, ed. M. H. Nitecki and D. V. Nitecki, 177-223. New .York: Plenum Press

Froment, A. 2001. Evolutionary biology and health of hunter-gatherer populations. In *Hunter-gatherers: An Interdisciplinary Perspective*, ed. C. Panter-Brick, R. Layton and P. Rowley-Conwy, 239-266. .Cambridge: Cambridge University Press

Fry, H. 1896. *History of North Atlantic Steam Navigation*. London: .Sampson, Low, Marston & Company

Fujimoto, T. 1999. *The Evolution of a Manufacturing System at* .*Toyota*. New York: Oxford University Press

Fussell, G. E. 1952. *The Farmer's Tools, 1500-1900*. London: A. .Melrose

Fussell, G. E. 1972. *The Classical Tradition in West European* .*Farming*. Rutherford: Fairleigh Dickinson University Press

Gaastra, F. S. 2007. *The Dutch East India Company*. Zutpen: .Walburg Press

Gaier, C. 1967. The origin of Mons Meg. *Journal of the Arms and .Armour Society London* 5:425-431

Galaty, J. G., and P. C. Salzman, eds. 1981. *Change and .Development in Nomadic and Pastoral Societies*. Leiden: E. J. Brill

Gales, B., et al. 2007. North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 years. *European Review of .Economic History* 2:219-253

Galloway, J. A., D. Keene, and M. Murphy. 1996. Fuelling the city: Production and distribution of firewood and fuel in London's region, .1290-1400. *Economic History Review* 49:447-472

Galor, O. 2005. *From Stagnation to Growth: Unified Growth Theory*. .Amsterdam: Elsevier

Gamarra, N. T. 1969. *Erroneous Predictions and Negative .Comments*. Washington, DC: Library of Congress

Gans, P. J. 2004. The medieval horse harness: Revolution or evolution? A case study in technological change. In *Villard's Legacy: Studies in Medieval Technology, Science and Art in Memory of Jean .Gimpel*, ed. M.-T. Zenner, 175-187. London: Routledge

Garcke, E. 1911. Electric lighting. In *Encyclopaedia Britannica*, 11th .ed., vol. 9., 651- 673. Cambridge: Cambridge University Press

Gardiner, R. 2000. *The Heyday of Sail: The Merchant Sailing Ship .1650-1830*. New York: Chartwell Books

.Gardner, J., ed. 2011. *Gilgamesh*. New York: Knopf Doubleday

Garrett, C., and M. Wade-Matthews. 2015. *The Ultimate .Encyclopedia of Steam and Rail*. London: Southwater Publishing

Gartner. 2015. Gartner says Smartphone sales surpassed one billion .units in 2014. http://www.gartner.com/newsroom/id/2996817

.Gaskell, E. 1855. *North and South*. London: Chapman & Hall

Gates, D. 2011. *The Napoleonic Wars 1803-1815*. New York: .Random House

Geerdes, M., H. Toxopeus, and C. van der Vliet. 2009. *Modern Blast .Furnace Ironmaking*. Amsterdam: IOS Press

Geertz, C. 1963. *Agricultural Involution*. Berkeley: University of .California Press

Gehlsen, D. 2009. *Social Complexity and the Origins of Agriculture*. .Saarbrücken: VDM Verlag

Georgescu-Roegen, N. 1975. Energy and economic myths. .*Ecologist* 5:164-174, 242-252

Georgescu-Roegen, N. 1980. Afterword. In *Entropy: A New World .View,* ed. J. Rifkin, 261-269. New York: Viking Press

Geothermal Energy Association. 2014. *2014 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report.* http://geo-energy.org/events/2014%20Annual%20US%20 %20& %Global%20Geothermal%20Power%20Production%20Report .20Final.pdf

Gerhold, D. 1993. *Road Transport before the Railways*. Cambridge: .Cambridge University Press

.Gesner, J. M., ed. 1735*. Scriptores rei rusticae*. Leipzig: Fritsch

Giampietro, M., and K. Mayumi. 2009. *The Biofuel Delusion*. London: .Earthscan

Gies, F., and J. Gies. 1995. *Cathedral Forge and Waterwheel: Technology and Invention in the Middle Ages*. New York: Harper.

Gill, R. B. 2000. *The Great Maya Droughts: Water, Life, and Death*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

Gille, B. 1978. *Histoire des techniques*. Paris: Gallimard.

Gimpel, J. 1997. *The Medieval Machine*. New York: Penguin Books.

Ginouvès, R. 1962. *Balaneutikè: Recherches sur le bain dans l'antiquité grecque*. Paris: de Boccard.

Glaser, B. 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 362:187-196.

Global Wind Energy Council. 2015. Global wind statistics 2014. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf.

Godfrey, F. P. 1982. *An International History of the Sewing Machine*. London: R. Hale.

Goe, M. R., and R. E. Dowell. 1980. *Animal Traction: Guidelines for Utilization*. Ithaca, NY: Cornell University, Department of Animal Science.

Gold, B., et al. 1984. *Technological Progress and Industrial Leadership: The Growth of the U.S. Steel Industry, 1900-1970*. Lexington, MA: D. C. Heath and Co.

Goldsmith. R. W. 1946. The power of Victory: Munitions output in World War II. *Military Affairs* 10:69-80.

Goldstein, D. B., S. Martinez, and R. Roy. 2011. Are there rebound effects from energy efficiency? An analysis of empirical data, internal .consistency, and solutions. *Electricity Policy* 2011:1-18

Gómez, J. J. H., V. Marquina, and R. W. Gómez. 2013. On the performance of Usain Bolt in the 100 m sprint. *European Journal of .Phycology* 34:1227-1233

Goren-Inbar, N., et al. 2004. Evidence of hominin control of fire at .Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *Science* 304:725-727

.Goudsblom, J. 1992. *Fire and Civilization*. London: Allen Lane

Grayson, D. K., and F. Delpech. 2002. Specialized early Upper Paleolithic hunters in southwestern France? *Journal of .Archaeological Science* 29:1439-1449

Greene, A. N. 2008. *Horses at Work*. Cambridge, MA: Harvard .University Press

Greene, K. 2000. Technological innovation and economic progress in the ancient world: M. I. Finley re-considered. *Economic History .Review* 53:29-59

Greeno, F. L., ed. 1912. *Obed Hussey Who, of All Inventors, Made .Bread Cheap*

.Rochester, NY: Rochester Herald Publishing Co

.Greenwood, W. H. 1907. *Iron*. London: Cassell

Griffiths, J. 1992. *The Third Man: The Life and Times of William .Murdoch 1754-1839*. London: Andre Deutsch

Grigg, D. B. 1974. *The Agricultural Systems of the World*. .Cambridge: Cambridge University Press

Grigg, D. B. 1992. The Transformation of Agriculture in the West. .Oxford: Blackwell

.Grimal, N. 1992. A History of Ancient Egypt. Oxford: Blackwell

Gronow, P., and I. Saunio. 1999. International History of the .Recording Industry. London: Bloomsbury Academic

.Grousset, R. 1938. L'empire des steppes. Paris: Payot

Grousset, R. 1970. The Epic of the Crusades. New York: Orion .Press

GSI (Global Subsidies Initiative). 2015. Global Subsidies Initiative. .https://www.iisd .org/gsi/fossil-fuel-subsidies

Gulflink. 1991. Fast facts about operations Desert Shield/Desert .Storm. http://www .gulflink.osd.mil/timeline/fast_facts.htm

Gunston, B. 1986. World Encyclopedia of Aero Engines. .Wellingborough: Patrick Stephens

Gunston, B. 1999. The Development of Piston Aero Engines. Yeovil: .Patrick Stephens

Gunston, B. 2002. Aviation: The First 100 Years. Hauppauge, NY: .Barron's Educational Series

Haaland, R., and P. Shinnie, eds. 1985. African Iron Working: .Ancient and Traditional. Oslo: Norwegian University Press

.Hadfield, C. 1969. The Canal Age. New York: Praeger

Hadland, T., and H.-E. Lessing. 2014. Bicycle Design: An Illustrated .History. Cambridge, MA: MIT Press

Haile-Selassie, Y., et al. 2015. New species from Ethiopia further .expands Middle Pliocene hominin diversity. Nature 521:483-488

Hair, T. H. 1844. Sketches of the Coal Mines in Northumberland and .Durham. London: J. Madden & Co

Hammel, E. M. 1985. The Root: The Marines in Beirut, August 1982- .February 1984. New York: Harcourt Brace Jovanovich

Hansell, M. H. 2005. Animal Architecture. Oxford: Oxford University .Press

Hansen, P. V. 1992. Experimental reconstruction of the medieval .trebuchet. Acta Archaeologica 63:189-208

Hanson, N. 2011. The Confident Hope of a Miracle: The True History .of the Spanish Armada. New York: Random House

Harlan, J. R. 1975. Crops and Man. Madison, WI: American Society .of Agronomy

Harlow, J. H. 2012. Electric Power Transformer Engineering. Boca .Raton, FL: CRC Press

Harmand, S., et al. 2015. 3.3-Million-year-old stone tools from .Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. Nature 521:310-315

Harris, J. R. 1988. *The British Iron Industry 1700-1850*. London: .Macmillan

Harris, M. 1966. The cultural ecology of India's sacred cattle. *Current* .*Anthropology* 7:51-66

Harrison, P. D., and B. L. Turner, eds. 1978. *Pre-Hispanic Maya* .*Agriculture*. Albuquerque: University of New Mexico Press

Harris, J. A., and F. G. Benedict. 1919. *A Biometric Study of Basal* .*Metabolism in Man*. Washington, DC: Carnegie Institution

Hart, J. F. 2004. *The Changing Scale of American Agriculture*. .Charlottesville: University of Virginia Press

Hartmann, F. 1923. *L'agriculture dans l'ancienne Egypte*. Paris: .Libraire-Imprimerie Réunies

Harverson, M. 1991. *Persian Windmills*. The Hague: International .Molinological Society

Hashimoto, T., et al. 2013. Hand before foot? Cortical somatotopy suggests manual dexterity is primitive and evolved independently of .bipedalism. *Philosophical Transactions B* 368 (1630): 1-12

Hassan, F. A. 1984. Environment and subsistence in Predynastic Egypt. In *From Hunters to Farmers*, ed. J. D. Clark and S. A. Brandt, .57-64. Berkeley: University of California Press

Haudricourt, A. G., and M. J. B. Delamarre. 1955. *L'Homme et la* .*Charrue à travers le Monde*. Paris: Gallimard

Haug, G. H., et al. 2003. Climate and collapse of Maya civilization. .*Science* 299:1731-1735

Haugaasen, J. M. T., et al. 2010. Seed dispersal of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) by scatter-hoarding rodents in a central .Amazonian forest. *Journal of Tropical Ecology* 26:251-262

Hausman, W. J., P. Hertner, and M. Wilkins. 2008. *Global Electrification: Multinational Enterprise and International Finance in* .*the History of Light and Power, 1878-2007*

.Cambridge: Cambridge University Press

Hawkes, K., J. F. O'Connell, and N. G. Blurton Jones. 2001. Hadza .meat sharing. *Evolution and Human Behavior* 22:113-142

Hayden, B. 1981. Subsistence and ecological adaptations of modern hunter/ gatherers. In *Omnivorous Primates*, ed. R. S. O. Harding and .G. Teleki, 344-421. New York: Columbia University Press

Haynie, D. 2001. *Biological Thermodynamics*. Cambridge: .Cambridge University Press

Headland, T. N., and L. A. Reid. 1989. Hunter-gatherers and their neighbors from prehistory to the present. *Current Anthropology*

.30:43-66

Heidenreich, C. 1971. *Huronia: A History and Geography of the* .*Huron Indians*. Toronto: McClelland and Stewart

Heinrich, B. 2001. Racing the Antelope: What Animals Can Teach Us .about Running and Life. New York: HarperCollins

Heizer, R. F. 1966. Ancient heavy transport, methods and .achievements. Science 153:821-830

Helland, J. 1980. Five Essays on the Study of Pastoralists and the .Development of Pastoralism. Bergen: Universitet i Bergen

Helliwell, J. F., R. Layard, and J. Sachs eds. 2015. World Happiness Report 2015. http:// worldhappiness.report/wp-content/uploads/sites/2/2 .WHR15-Apr29-update .pdf/015/04

Hemphill, R. 1990. Le transport de l'obélisque du Vatican. Etudes .Francaises 26 (3): 111-116

Henry, A. G., A. S. Brooks, and D. R. Piperno. 2014. Plant foods and the dietary ecology of Neanderthals and early modern humans. .Journal of Human Evolution 69:44-54

Heppenheimer, T. A. 1995. Turbulent Skies: The History of .Commercial Aviation. New York: John Wiley

Herlihy, D. V. 2004. Bicycle: The History. New Haven, CT: Yale .University Press

Herodotus. n.d. Book of Histories. Excerpt at http://www.cheops-.pyramide.ch/khufu -pyramid/herodotus.html

Herring, H. 2004. Rebound effect in energy conservation. In Encyclopedia of Energy, ed. C. Cleveland et al., vol. 5, pp. 411-423. .Amsterdam: Elsevier

.Herring, H. 2006. Energy efficiency: A critical view. Energy 31:10-20

Heston, A. 1971. An approach to the sacred cow of India. Current .Anthropology 12:191-209

Heyne, E. G., ed. 1987. Wheat and Wheat Improvement. Madison, .WI: American Society of Agronomy

Hildinger, E. 1997. Warriors of the Steppe: A Military History of Central Asia, 500 B.C. to A.D. 1700. New York: Sarpedon .Publishers

Hill, A. V. 1922. The maximum work and mechanical efficiency of human muscles and their most economical speed. Journal of .Physiology 56:19-41

Hill, D. 1984. A History of Engineering in Classical and Medieval .Times. La Salle, IL: Open Court Publishing

Hills, R. 1989. Power from Steam: A History of the Stationary Steam .Engine. Cambridge: Cambridge University Press

Hindle, B., ed. 1975. America's Wooden Age: Aspects of Its Early .Technology. Tarrytown, NY: Sleepy Hollow Restorations

.Hippisley, J. C. 1823. Prison Treadmills. London: W Nicol

Hitchcock, R. K., and J. I. Ebert. 1984. Foraging and food production among Kalahari hunter/gatherers. In From Hunters to Farmers, ed. J. D. Clark and S. A. Brandt, 328- 348. Berkeley: University of .California Press

Ho, P. 1975. *The Cradle of the East*. Hong Kong: Chinese University .of Hong Kong Press

Hodge, A. T. 1990. A Roman factory. *Scientific American* 263 (5): .106-111

Hodge, A. T. 2001. *Roman Aqueducts & Water Supply*. London: .Duckworth

Hodges, P. 1989. *How the Pyramids Were Built*. Longmead: Element .Books

Hoffmann, H. 1953. *Die chemische Veredlung der Steinkohle durch .Verkokung*. http:// epic.awi.de/23532/1/Hof1953a.pdf

Hogan, W. T. 1971. *Economic History of the Iron and Steel Industry .in the United States*. 5 vols. Lexington, MA: Lexington Books

Hogg, I. V. 1997. *German Artillery of World War Two*. Mechanicsville, .PA: Stackpole Books

Holley, I. B. 1964. *Buying Aircraft: Matérial Procurement for the Army .Air Forces*. Washington, DC: Department of the Army

Holliday, M. A. 1986. Body composition and energy needs during growth. In *Human Growth: A Comprehensive Treatise*, ed. F. Falkner .and J. M. Tanner, vol. 2, 101-117. New York: Plenum Press

Holt, P. M. 2014. *The Age of the Crusades: The Near East from the .Eleventh Century to 1517*. London: Routledge

Holt, R. 1988. *The Mills of Medieval England*. Oxford: Oxford .University Press

Homewood, K. 2008. *Ecology of African Pastoralist Societies*. .Oxford: James Curry

Hommel, R. P. 1937. *China at Work*. Doylestown, PA: Bucks County .Historical Society

Hong, S. 2001. *Wireless: From Marconi's Black-Box to the Audio*. .Cambridge, MA: MIT Press

Hopfen, H. J. 1969. *Farm Implements for Arid and Tropical Regions*. .Rome: FAO

Hough, R. and D. Richards. 2007. *Battle of Britain*. Barnsley: Pen & Sword Aviation.

Hounshell, D. A. 1981. Two paths to the telephone. *Scientific American* 244 (1): 157-163.

Howell, J. M. 1987. Early farming in Northwestern Europe. *Scientific American* 257 (5): 118-126.

Howell, J. W., and H. Schroeder. 1927. *The History of the Incandescent Lamp*. Schenectady, NY: Maqua Co.

Hoyt, E. P. 2000. *Inferno: The Fire Bombing of Japan, March 9-August 15, 1945*. New York: Madison Books.

Hua, J. 1983. The mass production of iron castings in ancient China. *Scientific American* 248:120-128.

Huang, N. 1958. *China Will Overtake Britain*. Beijing: Foreign Languages Press.

Hubbard, F. H. 1981. *Encyclopedia of North American railroading: 150 years of railroading in the United States and Canada*. New York: McGraw-Hill.

Hublin, J.-J., and M. P. Richards, eds. 2009. The Evolution of Hominin Diets: Integrating Approaches to the Study of Palaeolithic Subsistence. Berlin: Springer.

Hudson, P. 1990. Proto-industrialisation. Recent Findings of Research in Economics and Social History 10:1-4.

Hughes, Thomas P. 1983. Networks of Power. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.

Hugill, P. J. 1993. World Trade Since 1431. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.

Humphrey, W. S., and J. Stanislaw. 1979. Economic growth and .energy consumption in the UK, 1700-1975. Energy Policy 7:29-42

Hunley, J. D. 1995. The Enigma of Robert H. Goddard. Technology .and Culture 36:327-350

Hunter, L. C. 1975. Water power in the century of steam. In America's Wooden Age: Aspects of Its Early Technology, ed. B. .Hindle, 160-192. Tarrytown, PA: Sleepy Hollow Restorations

Hunter, L. 1979. A History of Industrial Power in the US, 1780-1930, .vol. 1. Charlottesville: University of Virginia Press

Hunter, L. C., and L. Bryant. 1991. A History of Industrial Power in the United States, 1780-1930. Vol. 3, The Transmission of Power. .Cambridge, MA: MIT Press

Husslage, G. 1965. Windmolens: Een overzicht van de verschillende .molensoorten en hun werkwijze. Amsterdam: Heijnis

Huurdeman, A. A. 2003. The Worldwide History of .Telecommunications. New York: John Wiley & Sons

Hyde, C. K. 1977. Technological Change and the British Iron Industry .1700-1870. Princeton, NJ: Princeton University Press

Hyland, A. 1990. Equus: The Horse in the Roman World. New .Haven, CT: Yale University Press

IBIS World. 2015. Bicycle manufacturing in China. .http://www.ibisworld.com/ industry/china/bicycle-manufacturing.html

IEA (International Energy Agency). 2015a. Energy Balances of Non-.OECD Countries. Paris: IEA

.IEA. 2015b. World balance. http://www.iea.org/sankey

Ienaga, S. 1978. The Pacific War, 1931-1945. New York: Pantheon .Books

ICCT (International Council on Clean Transportation). 2014. European

Vehicle Market Statistics. Pocketbook 2014. http://www.theicct.org/sites/default/files/ .publications/EU_pocketbook_2014.pdf

IFIA (International Fertilizer Industry Association). 2015. Market .outlook reports. http://www.fertilizer.org/MarketOutlooks

.Illich, I. 1974. Energy and Equity. New York: Harper and Row

IMF (International Monetary Fund). 2015. Counting the cost of energy subsidies. http://www.imf.org/external/pubs/ft/survey/so/2015 .new070215a.htm/

Intel. 2015. Moore's law and Intel innovation. http://www.intel.com/content/www/ us/en/history/museum-gordon- .moore-law.html

International Labour Organization. 2015. Forced labour, human trafficking and slavery. http://www.ilo.org/global/topics/forced-labour/la .ng--en/index.htm

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2015. [*Synthesis Report Summary for Policymakers*. Geneva: IPCC.] .*Climatic Change*:2014

Irons, W., and N. Dyson-Hudson, eds. 1972. *Perspective on* :*Nomadism*. Leiden

.E. J. Brill

IRRI (International Rice Research Institute). 2015. Rice milling. http://www .knowledgebank.irri.org/ericeproduction/PDF_&_Docs .Teaching_Manual_Rice _Milling.pdf/

Jakab, P. L. 1990. *Visions of a Flying Machine: The Wright Brothers and the Process of Invention*. Washington, DC: Smithsonian .Institution Press

Jamasmie, C. 2015. End of an era for UK coal mining: Last mines close up shop. http://www.mining.com/end-of-an-era-for-uk-coal-mi .ning-last-mines-close -up-shop

James, A. 2015. *Global PV Demand Outlook 2015-2020: Exploring Risk in Downstream Solar Markets*. GTM Research, June. http://www.greentechmedia.com/research/ report/global-pv-demand- .outlook-2015-2020

Janick, J. 2002. Ancient Egyptian agriculture and the origins of .horticulture. *Acta Horticulturae* 582:23-39

Jansen, M. B. 2000. *The Making of Modern Japan*. Cambridge, MA: .Belknap Press of Harvard University Press

Jehl, F. 1937. *Menlo Park Reminiscences*. Dearborn, MI: Edison .Institute

Jenkins, B. 1993. *Properties of Biomass, Appendix to Biomass .Energy Fundamentals*. Palo Alto, CA: EPRI

Jenkins, R. 1936. *Links in the History of Engineering and Technology .from Tudor Times*. Cambridge: Cambridge University Press

Jensen, H. 1969. *Sign, Symbol and Script*. New York: G. P. Putnam's .Sons

Jevons, W. S. 1865. *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal .Mines*. London: Macmillan

Jing, Y., and R. K. Flad. 2002. Pig domestication in ancient China. .*Antiquity* 76:724-732

Johannsen, O. 1953. *Geschichte des Eisens*. Dusseldorf: Verlag .Stahleisen

Johanson, D. 2006. How bipedalism arose. PBS, *Nova*, October 1. http://www.pbs .org/wgbh/nova/evolution/what-evidence-suggests.ht .ml

Johnson, E. D. 1973. *Communication: An Introduction to the History of the Alphabet, Writing, Printing, Books, and Libraries*. Metuchen, .NJ: Scarecrow Press

Jones, C. F. 2014. *Routes of Power*. Cambridge, MA: Harvard .University Press

.Jones, H. M. 1971. *The Age of Energy*. New York: Viking Press

.Jones, H. 1973. *Steam Engines*. London: Ernest Benn

.Josephson, M. 1959. *Edison: A Biography*. New York: McGraw-Hill

J.P. Morgan. 2015. *A Brave New World: Deep Decarbonization of .Electricity Grids*. New York: J. P. Morgan

Juleff, G. 2009. Technology and evolution: A root and branch view of Asian iron from first-millennium BC Sri Lanka to Japanese steel. .*World Archaeology* 41:557-577

Junqueira, A. B, G. H. Shepard, and C. R. Clement. 2010. Secondary forests on anthropogenic soils in Brazilian Amazonia conserve agrobiodiversity. *Biodiversity and Conservation* 19:1933-.1961

Kander, A. 2013. The second and third industrial revolutions. In *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries*, by A. Kander, P. Malanima, and P. Warde, 249-386. .Princeton, NJ: Princeton University Press

Kander, A., P. Malanima, and P. Warde. 2013. *Power to the People: Energy in Europe over the Last Five Centuries*. Princeton, NJ:

.Princeton University Press

Kander, A., and P. Warde. 2011. Energy availability from livestock and agricultural productivity in Europe, 1815-1913: A new .comparison. *The Economic History Review* 64:1-29

Kanigel, R. 1997. *The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and .the Enigma of Efficiency*. New York: Viking

Kaplan, D. 2000. The darker side of the "Original Affluent Society." .*Journal of Anthropological Research* 56:301-324

Karim, M. R., and M. S. H. Fatt. 2005. Impact of the Boeing 767 aircraft into the World Trade Center. *Journal of Engineering .Mechanics* 131:1066-1072

Karkanas, P., et al. 2007. Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, .Israel. *Journal of Human Evolution* 53:197-212

Kaufer, D. S., and K. M. Carley. 1993. *Communication at a Distance: The Influence of Print on Sociocultural Organization and Change*. .Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates

Kaufmann, R. K. 1992. A biophysical analysis of the energy/real GDP ratio: Implications for substitution and technical change. .*Ecological Economics* 6:35-56

Kay, J. P. 1832. *The Moral and Physical Condition of the Working Classes Employed in the Cotton Manufacture in Manchester*. .London: Ridgway

Keay, J. 2010. *The Honourable Company: A History of the English .East India Company*. London: HarperCollins UK

.Keegan, J. 1994. *A History of Warfare*. New York: Vintage

Keeling, C. D. 1998. Rewards and penalties of monitoring the Earth. .*Annual Review of Energy and the Environment* 23: 25-82

Kelly, R. L. 1983. Hunter-gatherer mobility strategies. *Journal of .Anthropological Research* 39:277-306

.Kendall, A. 1973. *Everyday Life of Incas*. London: B. T. Batsford

Kennedy, C. A., et al. 2015. Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United .States of America* 112:5985-5990

Kennedy, E. 1941. *The Automobile Industry: The Coming of Age of .Capitalism's Favorite Child*. New York: Reynal & Hitchcock

Kesaris, P. 1977. *Manhattan Project: Official History and Documents*. .Washington, DC: University Publications of America

Khaira, G. 2009. Coal transportation logistics. Annual Community .Coal Forum, Tumbler Ridge, BC

Khalturin, V. I., et al. 2005. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955-1990. *Science & Global Security* 13 .(1): 1-42

Khazanov, A. M. 1984. *Nomads and the Outside World*. Cambridge: .Cambridge University Press

Khazanov, A. M. 2001. *Nomads in the Sedentary World*. London: .Curzon

Kilby, Jack S. 1964. *Miniaturized Electronic Circuits*. U.S. Patent .3,138,743, June 23, 1964. Washington, DC: USPTO

King, C. D. 1948. *Seventy-five Years of Progress in Iron and Steel*. .New York: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers

King, F. H. 1927. *Farmers of Forty Centuries*. New York: Harcourt, .Brace & Co

King, P. 2011. The choice of fuel in the eighteenth century iron industry: The Coalbrookdale accounts reconsidered. *Economic*

.*History Review* 64:132-156

King, R. 2000. *Brunelleschi's Dome: How a Renaissance Genius Reinvented Architecture*. London: Chatto & Windus.

King, P. 2005. The production and consumption of bar iron in early modern England and Wales. *Economic History Review* 58:1-33.

Kingdon, J. 2003. *Lowly Origin: Where, When, and Why Our Ancestors First Stood Up*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Klein, H. A. 1978. Pieter Bruegel the Elder as a guide to 16th-century technology. *Scientific American* 238 (3): 134-140.

Klima, B. 1954. Paleolithic huts at Dolni Vestonice, Czechoslovakia. *Antiquity* 28:4-14.

Kloss, E. 1963. *Der Luftkrieg über Deutschland, 1939-1945*. Munich: DTV.

Komlos, J. 1988. Agricultural productivity in America and Eastern Europe: A comment. *Journal of Economic History* 48:664-665.

Konrad, T. 2010. MV Mont, Knock Nevis, Jahre Viking—World's largest supertanker. *gCaptain* July 18,2020. http://gcaptain.com/mont-knock-nevis-jahre-viking-worlds -largest-tanker-ship/#.Vc3zB4dRGM8.

Kongshaug, G. 1998. *Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in Fertilizer Production*. Paris: International Fertilizer Association.

Kopparapu, R. K., et al. 2014. Habitable zones around main sequence stars: Dependence on planetary mass. *Astrophysical Journal. Letters* 787:L29.

Kranzberg, M., and C. W. Pursell, eds. 1967. *Technology in Western Civilization*, vol. 1. New York: Oxford University Press.

Krausmann, F., and H. Haberl. 2002. The process of Industrialization from an energetic metabolism point of view: Socio-economic energy .flows in Austria 1830-1995. *Ecological Economics* 41:177-201

Kumar, S. N. 2004. Tanker transportation. In *Encyclopedia of* .*Energy*, vol. 6, ed. C. Cleveland et al., 1-12. Amsterdam: Elsevier

Kushnirs, I. 2015. Gross Domestic Product (GDP) in USSR. .http://kushnirs.org/ macroeconomics/gdp/gdp_ussr.html#leader1

Kuthan, J. and J. Royt. 2011. *Katedrála sv. Víta, Václava a Vojtěcha: Svatyně českých patronů a králů.* Praha: Nakladatelství Lidové .noviny

Kuthan, M., et al. 2003. Domestication of wild *Saccharomyces cerevisiae* is accompanied by changes in gene expression and .colony morphology. *Molecular Microbiology* 47:745-754

Kuznets, S. S. 1971. *Economic Growth of Nations: Total Output and Production Structure*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard .University Press

Lacey, J. M. 1935. *A Comprehensive Treatise on Practical* .*Mechanics*. London: Technical Press

Laloux, R., et al. 1980. Nutrition and fertilization of wheat. In *Wheat*, .19-24. Basel: CIBA-Geigy

Lancaster, L. C. 2005. *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context*. Cambridge: Cambridge University .Press

Landels, J. G. 1980. *Engineering in the Ancient World*. London: .Chatto & Windus

Landes, David. 1969. *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to* .*the Present*. Cambridge: Cambridge University Press

Langdon, J. 1986. *Horses, Oxen, and Technological Innovation*. .Cambridge: Cambridge University Press

Lannoo, B. 2013. Energy consumption of ICT networks. Brussels: TREND Final Workshop. http://www.fp7-trend.eu/.../energyconsumptionincen .tives-energy -efficient-net

Lardy, N. 1983. *Agriculture in China's Modern Economic* .*Development*. Cambridge: Cambridge University Press

Latimer, B. 2005. The perils of being bipedal. *Annals of Biomedical* .*Engineering* 33:3-6

Lawler, A. 2016. Megaproject asks: What drove the Vikings? *Science* .352:280-281

Layard, A. H. 1853. *Discoveries among the Ruins of Nineveh and* .*Babylon*. New York: G.P. Putnam & Company

Layard, R. 2005. *Happiness: Lessons from a New Science*. New .York: Penguin Press

Layton, E. T. 1979. Scientific technology, 1845-1900: The hydraulic turbine and the origins of American industrial research. *Technology* .*and Culture* 20:64-89

Leach, E. R. 1959. Hydraulic society in Ceylon. *Past & Present* 15:2-.26

Lécuyer, C., and D. C. Brock. 2010. *Makers of the Microchip*. .Cambridge, MA: MIT Press

Lee, R. B., and R. Daly, eds. 1999. *The Cambridge Encyclopaedia of* .*Hunters and Gatherers*. Cambridge: Cambridge University Press

Lee, R. B., and I. DeVore, eds. 1968. *Man the Hunter*. New York: .Aldine de Gruyter

Lefebvre des Noëttes, R. 1924. *La Force Motrice animale à travers .les Âges*. Paris: Berger-Levrault

Legge, A. J., and P. A. Rowley-Conwy. 1987. Gazelle killing in Stone .Age Syria. *Scientific American* 257 (2): 88-95

Lehner, M. 1997. *The Complete Pyramids*. London: Thames and .Hudson

Lenin, V. I. 1920. Speech delivered to the Moscow Gubernia Conference of the R.C.P. (B.), November 21, 1920. .https://www.marxists.org/archive/lenin/works/ 1920/nov/21.htm

Lenstra, J. A., and D. G. Bradley. 1999. Systematics and phylogeny of cattle. In *The Genetics of Cattle*, ed. R. Fries and A. Ruvinsky, 1-.14. Wallingford: CABI

Leon, P. 1998. *The Discovery and Conquest of Peru, Chronicles of the New World Encounter*, ed. and trans. A. P. Cook and N. D. Cook. .Durham, NC: Duke University Press

Leonard, W. R., J. J. Snodgrass, and M. L. Robertson. 2007. Effects of brain evolution on human nutrition and metabolism. *Annual .Review of Nutrition* 27:311-327

Leonard, W. R., et al. 2003. Metabolic correlates of hominid brain evolution. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* 136:5-.15

Lepre, J. P. 1990. *The Egyptian Pyramids*. Jefferson, NC: McFarland .& Co

Lerche, G. 1994. *Ploughing Implements and Tillage Practices in Denmark from the Viking Period to about 1800: Experimentally .Substantiated*. Herning: P. Kristensen

Leser, P. 1931. *Entstehung und Verbreitung des Pfluges*. Münster: .Aschendorff

Lesser, I. O. 1991. *Oil, the Persian Gulf, and Grand Strategy*. Santa .Monica, CA: Rand Corp

Leveau, P. 2006. *Les moulins de Barbegal (1986-2006)* . .http://traianus.rediris.es

Levine, A. J. 1992. *The Strategic Bombing of Germany, 1940-1945*. .London: Greenwood

Levinson, M. 2006. The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger. Princeton, NJ: .Princeton University Press

Levinson, M. 2012. U.S. Manufacturing in International Perspective. Washington, DC: Congressional Research Service; .http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R42135.pdf

Lewin, R. 2004. Human Evolution: An Illustrated Introduction. .Oxford: Wiley

Lewis, M. J. T. 1993. The Greeks and the early windmill. History and .Technology 15:141-189

Lewis, M. J. T. 1994. The origins of the wheelbarrow. Technology .and Culture 35:453-475

Lewis, M. J. T. 1997. Millstone and Hammer: The Origins of Water-.Power. Hull: University of Hull Press

Li, L. 2007. Fighting Famine in North China: State, Market, and Environmental Decline, 1690s-1990s. Stanford, CA: Stanford .University Press

Liebenberg, L. 2006. Persistence hunting by modern hunter-.gatherers. Current Anthropology 47:1017-1025

Lighting Industry Association. 2009. Lamp history. .http://www.thelia.org.uk/ lighting-guides/lamp-guide/lamp-history

Lilienfeld, E. J. 1930. Method and apparatus for controlling electric currents. US Patent 1,745,175, January 28, 1930. Washington, DC: USPTO.

Lilienthal, D. E. 1944. TVA: Democracy on the March. New York: Harper and Brothers.

Lindgren, M. 1990. Glory and Failure. Cambridge, MA: MIT Press.

Lindsay, R. B. 1975. Energy: Historical Development of the Concept. Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross.

Ling, P. J. 1990. America and the Automobile: Technology, Reform and Social Change. Manchester: Manchester University Press.

Linsley, J. W., E. W. Rienstra, and J. A. Stiles. 2002. Giant under the Hill: History of the Spindletop Oil Discovery at Beaumont, Texas, in 1901. Austin: Texas State Historical Association.

Livi-Bacci, M. 1991. Population and Nutrition. Cambridge: Cambridge University Press.

Livi-Bacci, M. 2000. The Population of Europe. Oxford: Blackwell.

Livi-Bacci, M. 2012. A Concise History of World Population. Oxford: Wiley-Blackwell.

Lizerand, G. 1942. *Le régime rural de l'ancienne France*. Paris: Presses Universitaires.

Lizot, J. 1977. Population, resources and warfare among the Yanomami. *Man* 12:497-517.

Lockwood, A. H. 2012. *The Silent Epidemic: Coal and the Hidden Threat to Health*. Cambridge, MA: MIT Press.

Looney, R. 2002. *Economic Costs to the United States Stemming from the 9/11 Attacks*. Monterey, CA: Center for Contemporary Conflict.

.López, A. E. 2014. *La conquista de América*. Barcelona: RBA Libros

Lotka, A. J. 1922. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United* .*States of America* 8:147-151

Lotka, A. 1925. *Elements of Physical Biology*. Baltimore, MD: .Williams and Wilkins

Lovejoy, C. O. 1988. Evolution of human walking. *Scientific* .*American* 259 (5): 82-89

Lowrance, R., et al., eds. 1984. *Agricultural Ecosystems*. New York: .John Wiley

Lubar, S. 1992. "Do not fold, spindle or mutilate": A cultural history of .the punch card. *Journal of American Culture* 15 (4): 43-55

Lucas, A. R. 2005. Industrial milling in the ancient and medieval Worlds. A survey of the evidence for an industrial revolution in .medieval Europe. *Technology and Culture* 4: 1-30

Lucassen, J., and R. W. Unger. 2011. Shipping, productivity and economic growth. In *Shipping Efficiency and Economic Growth* :*1350-1850*, ed. R. W. Unger, 3-44. Leiden

.Brill

.Lucchini, F. 1996. *Pantheon*. Roma: Nova Italia Scientifica

Luknatskii, N.N. 1936. Podnyatie Aleksandrovskoi kolonny v 1832. .*Stroitel'naya Promyshlennost'* 1936 (13) :31-34

Lüngen, H. B. 2013. Trends for reducing agents in blast furnace operation. http://www.dkg.de/akk-vortraege/2013-_-2rd_polnisc .h_deutsches_symposium/ abstract-luengen_reducing-agents.pdf

MacDonald, W. L. 1976. *The Pantheon Design, Meaning, and* .*Progeny*. Cambridge, MA: Harvard University Press

Macedo, I. C., M. R. L. V. Leal, and J. E. A. R. da Silva. 2004. *Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Fuel Ethanol in Brazil*. São Paulo: Government of the State of .São Paulo; http://unica.com.br/i_pages/files/pdf_ingles.pdf

Machiavello, C. M. 1991. *La construcción del sistema agrario en la .civilización andina*. Lima: Editorial Econgraf

MacLaren, M. 1943. *The Rise of the Electrical Industry During the .Nineteenth Century*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Madden, J. 2015. How much software is in your car? From the 1977 Toronado to the Tesla P85D. http://www.qsm.com/blog/2015/how-much-software-you .r-car-1977 -toronado-tesla-p85d

Maddison Project. 2013. Maddison Project. .http://www.ggdc.net/maddison/ maddison-project/home.htm

Madureira, N. L. 2012. The iron industry energy transition. *Energy .Policy* 50:24-34

Magee, D. 2005. *The John Deere Way: Performance That Endures*. .New York: Wiley

Mak, S. 2010. *Rice Cultivation—The Traditional Way*. Solo, Java: .(CRBOM (Center for River Basin Organizations and Management

Malanima, P. 2006. Energy crisis and growth 1650-1850: The European deviation in a comparative perspective. *Journal of Global .History* 1:101-121

Malanima, P. 2013a. Energy consumption in the Roman world. In *The Ancient Mediterranean Environment between Science and :History*, ed. W. V. Harris, 13-36. Leiden

.Brill

Malanima, P. 2013b. Pre-industrial economies. In *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries*, ed. A. Kander, P. Malanima, and P. Warde, 35-127. Princeton, NJ: .Princeton University Press

Malik. J. 1985. *The Yields of Hiroshima and Nagasaki Explosions*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory. .http://atomicarchive.com/Docs/pdfs/00313791.pdf

Malone, P. M. 2009. Waterpower in Lowell: Engineering and Industry in NineteenthCentury America. Baltimore, MD: Johns Hopkins .University Press

Manx National Heritage. 2015. The Great Laxey Wheel. http://www

.manxnationalheritage.im/attractions/laxey-wheel.

Marchetti, C. 1986. Fifty-year pulsation in human affairs. Futures .18:376-388

Marder, T. A., and M. W. Jones. 2015. The Pantheon: From Antiquity .to the Present. Cambridge: Cambridge University Press

Mark, J. 1985. Changes in the British brewing industry in the twentieth century. In Diet and Health in Modern Britain, ed. D. J. .Oddy and D. P. Miller, 81-101. London: Croom Helm

Marlowe, F. W. 2005. Hunter-gatherers and human evolution. .Evolutionary Anthropology 14:54-67

Marshall, R. 1993. Storm from the East: From Genghis Khan to .Khublai Khan. Berkeley: University of California Press

Martin, C., and G. Parker. 1988. The Spanish Armada. London: .Hamish Hamilton

Martin, P. S. 1958. Pleistocene ecology and biogeography of North .America. Zoogeography 151:375-420

Martin, P. S. 2005. Twilight of the Mammoths. Berkeley: University of
.California Press

Martin, T. C. 1922. Forty Years of Edison Service, 1882-1922:
Outlining the Growth and Development of the Edison System in New
.York City. New York: New York Edison Company

Mason, S. L. R. 2000. Fire and Mesolithic subsistence: Managing
oaks for acorns in northwest Europe? Palaeogeography,
.Palaeoclimatology, Palaeoecology 164:139-150

Mauthner, F., and W. Weiss. 2014. Solar Heat Worldwide 2012.
.Paris: IEA

Maxton, G. P., and J. Wormald. 2004. Time for a Model Change: Re-
engineering the Global Automotive Industry. Cambridge: Cambridge
.University Press

Maxwell, J. C. 1865. A dynamical theory of the electromagnetic field.
Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155:459-
.512

May, G. S. 1975. A Most Unique Machine: The Michigan Origins of
the American Automobile Industry. Grand Rapids, MI: William B.
.Eerdmans Publishing

May, T. 2013. The Mongol Conquests in World History. London:
.Reaktion Books

Mayhew, H., and J. Binny. 1862. The Criminal Prisons of London:
.And Scenes of Prison Life. London: Griffin, Bohn, and Co

.Mays, L. W., ed. 2010. Ancient Water Technologies. Berlin: Springer

Mays, L. W., and Y. Gorokhovich. 2010. Water technology in the
ancient American Societies. In Ancient Water Technologies, ed. L.
.W. Mays, 171-200. Berlin: Springer

Mazoyer, M., and L. Roudart. 2006. A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis. New York: Monthly .Review Press

McCalley, B. 1994. Model T Ford: The Car That Changed the World. .Iola, WI: Krause Publications

McCartney, A. P., ed. 1995. Hunting the Largest Animals: Native Whaling in the Western Arctic and Subarctic. Studies in Whaling 3. .Edmonton, AB: Canadian Circumpolar Institute

McCloy, S. T. 1952. French Inventions of the Eighteenth Century. .Lexington: University of Kentucky Press

McCullough, D. 2015. The Wright Brothers. New York: Simon & .Schuster

McDougall, I., F. H. Brown, and J. G. Fleagle. 2005. Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia. Nature .433:733-736

McGranahan, G., and F. Murray, eds. 2003. Air Pollution and Health .in Rapidly Developing Countries. London: Routledge

McHenry, H. M., and K. Coffing. 2000. Australopithecus to Homo: Transformations in body and mind. Annual Review of Anthropology .29:125-146

.McKeown, T. 1976. The Modern Rise of Population. London: Arnold

McNeill, J. R. 2001. Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century. New York: W. W. .Norton

McNeill, W. H. 1980. The Human Condition. Princeton, NJ: Princeton .University Press

McNeill, W. H. 1989. The Age of Gunpowder Empires, 1450-1800. .Washington, DC: American Historical Association

McNeill, W. H. 2005. Berkshire Encyclopedia of World History 5 .Volumes. Great Barrington, MA: Berkshire Publishing

McShane, C., and J. A. Tarr. 2007. The Horse in the City. Baltimore, .MD: Johns Hopkins University Press

Medeiros, L. C., et al. 2001. Nutritional Content of Game Meat. Laramie: University of Wyoming. http://www.wyomingextension.org/agpubs/pubs/B920R .pdf.

Meldrum, R. A., and C. E. Hilton, eds. 2004. From Biped to Strider: The Emergence of Modern Human Walking, Running, and Resource .Transport. Berlin: Springer

Mellars, P. A. 1985. The ecological basis of social complexity in the Upper Paleolithic of Southwestern France. In *Prehistoric Hunter-.Gatherers*, ed. T. D. Price and J. A

.Brown, 271-297. Orlando, FL: Academic Press

Mellars, P. 2006. Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60000 years ago? A new model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* .103:9381-9386

Melosi, M. V. 1982. Energy transition in the nineteenth-century economy. In *Energy and Transport*, ed. G. H. Daniels and M. H. .Rose, 55-67. Beverly Hills, CA: Sage Publications

Melville, H. 1851. *Moby-Dick or the Whale*. New York: Harper & .Brothers

Mendels, F. F. 1972. Proto-industrialization: The first phase of the .industrialization process. *Journal of Economic History* 32:241-261

Mendelssohn, K. 1974. *The Riddle of the Pyramids*. London: .Thames and Hudson

Mensch, Gerhard. 1979. *Stalemate in Technology*. Cambridge, MA: Ballinger.

Mercer, D. 2006. *The Telephone: The Life Story of a Technology*. New York: Greenwood Publishing Group.

Merrill, A. L., and B. K. Watt. 1973. *Energy Value of Foods: Basis and Derivation*. Washington, DC: United States Department of Agriculture.

Meyer, J. H. 1975. *Kraft aus Wasser: Vom Wasserrad zur Pumpturbine*. Innertkirchen: Kraftwerke Oberhasli.

Mill, J. S. 1913. *The Panama Canal. A History and Description of the Enterprise*. New York: Sully & Kleinteich.

Minchinton, W. 1980. Wind power. *History Today* 30 (3): 31-36.

Minchinton, W., and P. Meigs. 1980. Power from the sea. *History Today* 30 (3): 42-46.

Minetti, A. E. 2003. Efficiency of equine express postal systems. *Nature* 426: 785-786.

Minetti, A. E., et al. 2002. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *Journal of Applied Physiology* 93:1039-1046.

Mir-Babaev, M. F. 2004. *Kratkaia khronologiia istorii azerbaidzhanskogo neftiianogo dela*. Baku: Sabakh.

Mitchell, W. A. 1931. *Outlines of the World's Military History*. Harrisburg, PA: Military Service Publishing.

mobiForge. 2015. Global mobile statistics 2014. https://mobiforge.com/research-analysis/global-mobile-statistics-2014-part-a-mobile-subscribers-handset-market-share-mobile-operators.

Mokyr, J. 1976. *Industrialization in the Low Countries, 1795-1850*. .New Haven, CT: Yale University Press

Mokyr, J. 2002. *The Gifts of Athena: Historical Origins of the* .*Knowledge Economy*. Princeton, NJ: Princeton University Prss

Mokyr, J. 2009. *The Enlightened Economy: An Economic History of* .*Britain 1700-1850*. New Haven, CT: Yale University Press

.Molenaar, A. 1956. *Water Lifting Devices for Irrigation*. Rome: FAO

Moore, G. 1965. Cramming more components onto integrated .circuits. *Electronics* 38 (8): 114-117

Moore, G. E. 1975. Progress in digital integrated electronics. *Technical Digest, IEEE International Electron Devices Meeting*, 11-.13

Morgan, R. 1984. *Farm Tools, Implements, and Machines in Britain: Pre-history to 1945*. Reading: University of Reading and the British .Agricultural History Society

Moritz, L. A. 1958. *Grain-Mills and Flour in Classical Antiquity*. .Oxford: Clarendon Press

Moritz, M. 1984. The Little Kingdom: The Private Story of Apple .Computer. New York: W. Morrow

Morrison, J. S., and J. F. Coates. 1986. The Athenian Trireme. .Cambridge: Cambridge University Press

Morrison, J. S., J. F. Coates, and B. Rankov. 2000. The Athenian Trireme: The History and Reconstruction of an Ancient Greek .Warship. Cambridge: Cambridge University Press

Morrison, J. S., and R. Gardiner, eds. 1995. The Age of the Galley: Mediterranean Oared Vessels since Pre-Classical Times. London: .Conway Maritime

Morton, H. 1975. The Wind Commands: Sailors and Sailing Ships in .the Pacific. Vancouver: University of British Columbia Press

Mozley, J. H. 1928. Statius. Silvae: Thebaid I-IV. London: William .Heinemann

Mukerji, C. 1981. From Graven Images: Patterns of Modern .Materialism. New York: Columbia University Press

Muldrew, C. 2011. Food, Energy and the Creation of Industriousness: Work and Material Culture in Agrarian England, .1550-1780. Cambridge: Cambridge University Press

Muller, G., and K. Kauppert. 2004. Performance characteristics of .water wheels. Journal of Hydraulic Research 42:451-460

Müller, I. 2007. A History of Thermodynamics: The Doctrine of .Energy and Entropy. Berlin: Springer

.Müller, W. 1939. Die Wasserräder. Detmold: Moritz Schäfer

Mumford, L. 1934. Technics and Civilization. New York: Harcourt, .Brace & Company

Mumford, L. 1961. The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects. New York: Harcourt, Brace & .World

Mumford, L. 1967. Technics and Human Development. New York: .Harcourt, Brace & World

Mundlak, Y. 2005. Economic growth: Lessons from two centuries of .American agriculture. Journal of Economic Literature 43:989-1024

.Murdock, G. P. 1967. Ethnographic atlas. Ethnology 6:109-236

Murphy, D. J. 2007. People, Plants, and Genes: The Story of Crops .and Humanity. Oxford: Oxford University Press

Murphy, D. J., and C. A. S. Hall. 2010. EROI or energy return on (energy) invested. Annals of the New York Academy of Sciences .1185:102-118

Murra, J. V. 1980. The Economic Organization of the Inka State. .Greenwood, CT: JAO Press

Mushet, D. 1804. Experiments on wootz or Indian steel. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, .Mathematical and Physical Sciences 95:175

Mushrush, G. W., et al. 2000. Use of surplus napalm as an energy .source. Energy Sources 22:147-155

Mussatti, D. C. 1998. Coke Ovens: Industry Profile. Research .Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency

Musson, A. E. 1978. The Growth of British Industry. New York: .Holmes & Meier

Nagata, T. 2014. Japan’s Policy on Energy Conservation. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry. http://www.meti.go.jp/english/policy/energy_envir ./onment

Napier, J. R. 1970. The Roots of Mankind. Washington, DC: .Smithsonian Institution Press

National Coal Mining Museum. 2015. National Coal Mining Museum .for England. https://www.ncm.org.uk

National Geographic Society. 2001. Pearl Harbor ships and planes. http://www .nationalgeographic.com/pearlharbor/history/pearlh .arbor_facts.html

Naville, E. 1908. The Temple of Deir el Bahari. Part VI. London: The .Egyptian Exploration Fund

Needham, J. 1964. The Development of Iron and Steel in China. .London: The Newcomen Society

Needham, J. 1965. *Science and Civilisation in China*. Vol. 4, Part II. *Physics and Physical Technology*. Cambridge: Cambridge University .Press

Needham, J. et al. 1954-2015. *Science and Civilisation in China*. 7 .volumes. Cambridge: Cambridge University Press

Needham, J., et al. 1971. *Science and Civilisation in China*. Vol. 4, Part III. *Civil Engineering and Nautics*. Cambridge: Cambridge .University Press

Needham, J., et al. 1986. *Science and Civilisation in China*. Vol. 5, Part VII. *Military Technology: The Gunpowder Epic*. Cambridge: .Cambridge University Press

Nef, J. U. 1932. *The Rise of the British Coal Industry*. London: G. .Routledge

Nelson, W. H. 1998. *Small Wonder: The Amazing Story of the* .*Volkswagen Beetle*. Cambridge, MA: Robert Bentley

Nesbitt, M., and G. Prance. 2005. *The Cultural History of Plants*. .London: Taylor & Francis

Newhall, B. 1982. *The History of Photography: From 1839 to the* .*Present*. New York: Museum of Modern Art

Newitt, M. 2005. *A History of Portuguese Overseas Expansion,* .*1400-1668*. London: Routledge

Nicholson, J. 1825. *Operative Mechanic, and British Machinist*. .London: Knight and Lacey

Niel, F. 1961. *Dolmens et menhirs*. Paris: Presses Universitaires de .France

Nishiyama, M., and G. Groemer. 1997. *Edo Culture: Daily Life and Diversions in Urban Japan, 1600-1868*. Honolulu: University of .Hawaii Press

NOAA. 2015. Trends in atmospheric carbon dioxide. .ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/ products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt

Noelker, K., and J. Ruether. 2011. Low energy consumption :ammonia production

Baseline energy consumption, options for energy optimization. Nitrogen + Syngas Conference 2011, Düsseldorf. http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/ fileadmin/documents/publications/Nitrogen-Syngas-2 Low_Energy_Consumption/011 ._Ammonia_Production_2011_paper.pdf

Noguchi, Tatsuo, and Toshishige Fujii. 2000. Minimizing the effect of .natural disasters. *Japan Railway & Transport Review* 23:52-59

Nordhaus, W. D. 1998. *Do Real-Output and Real-Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not*. New Haven, CT: Cowles Foundation for Research in Economics at Yale .University

Norenzayan, A. 2013. Big Gods: How Religion Transformed .Cooperation and Conflict

.Princeton, NJ: Princeton University Press

Norgan, N. G., et al. 1974. The energy and nutrient intake and the energy expenditure of 204 New Guinean adults. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological .Sciences 268:309-348

Norris, J. 2003. Early Gunpowder Artillery: 1300-1600. Marlborough: .Crowood Press

North American Electric Reliability Corporation. 2015. State of Reliability 2015. http://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/Performance%20Analy .sis%20DL/2015%20 State%20of%20Reliability.pdf

Noyce, Robert N. 1961. Semiconductor Device-and-Lead Structure. .U.S. Patent 2,981,877, April 25, 1961. Washington, DC: USPTO

.Nutrition Value. 2015. Nutrition value. http://www.nutritionvalue.org

Nye, D. E. 1992. Electrifying America: Social Meaning of a New .Technology. Cambridge, MA: MIT Press

Nye, D. E. 2013. America's Assembly Line. Cambridge, MA: MIT .Press

Oberg, E., et al. 2012. Machinery's Handbook, 29th ed. South .Norwalk, CT: Industrial Press

O'Brien, P., ed. 1983. Railways and the Economic Development of .Western Europe, 1830-1914. New York: St. Martin's Press

Odend'hal, S. 1972. Energetics of Indian cattle in their environment. .*Human Ecology* 1:3-22

Odum, H. T. 1971. *Environment, Power, and Society*. New York: .Wiley-Interscience

Okigbo, B. N. 1984. *Improved Production Systems as an Alternative .to Shifting Cultivation*. Rome: FAO

Oklahoma State University. 2015. Horses. .http://www.ansi.okstate.edu/breeds/ horses

Oleson, J. P. 1984. *Greek and Roman Mechanical Water-Lifting Devices: The History of a Technology*. Toronto: University of Toronto .Press

Oleson, J. P., ed. 2008. *The Oxford Handbook of Engineering and* .*Technology in the Classical World*. Oxford: Oxford University Press

Oliveira, A. R. E. 2014. *A History of the Work Concept: From Physics* .*to Economics*. Dordrecht: Springer

Olivier, J. G. J. 2014. *Trends in Global CO_2 Emissions: 2014 Report*. The Hague: Netherlands Environmental Assessment Agency. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/ jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-repor .t-93171.pdf

Olson, M. 1982. *The Rise and Fall of Nations*. New Haven, CT: Yale .University Press

Olsson, F. 2007. *Järnhanteringens dynamic: Produktion, lokalisering och agglomerationer i Bergslagen och Mellansverige 1368-1910*. .Umeå: Umeå Studies in Economic History

Olsson, M., and P. Svensson, eds. 2011. *Growth and Stagnation in* .*European Historical Agriculture*. Turnhout: Brepols

Ohno, T. 1988. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale* .*Production*. Cambridge, MA: Productivity Press

OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries). 2015. Who gets what from imported oil? .http://www.opec.org/opec_web/en/publications/341 .htm

Orme, B. 1977. The advantages of agriculture. In *Hunters, Gatherers and First Farmers beyond Europe*, ed. J. V. S. Megaw, 41-49. .Leicester: Leicester University Press

.Orwell, G. 1937. *The Road to Wigan Pier*. London: Victor Gollancz

Osirisnet. 2015. Djehutyhotep. http://www.osirisnet.net/tombes/el_bersheh/

.djehoutyhotep/e_djehoutyhotep_02.htm

Ostwald, W. 1912. Der energetische Imperativ . Leipzing: Akademische

.Verlagsgesselschaft

Outram, A. K., et al. 2009. The earliest horse harnessing and .milking. *Science* 323:1332-1335

Ovitt, G. 1987. The Restoration of Perfection: Labor and Technology .in Medieval Culture. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press

.Owen, D. 2004. Copies in Seconds. New York: Simon and Schuster

Pacey, A. 1990. Technology in World Civilization. Cambridge, MA: .MIT Press

Palgrave Macmillan, ed. 2013. International Historical Statistics. London: Palgrave Macmillan; http://www.palgraveconnect.com/pc/connect/archive .s/ihs.html

Pan, W., et al. 2013. Urban characteristics attributable to density-driven tie formation. Nature Communications . .http://hdl.handle.net/1721.1/92362

Park, J., and T. Rehren. 2011. Large-scale 2nd and 3rd century AD bloomery iron smelting in Korea. Journal of Archaeological Science .38:1180-1190

Parker, G. 1996. The Military Revolution: Military Innovation and the Rise of the West, 1500-1800. Cambridge: Cambridge University .Press

Parker, G., ed. 2005. The Cambridge History of Warfare. Cambridge: .Cambridge University Press

Parris, H. S., M.-C. Daunay, and J. Janick. 2012. Occidental diffusion of cucumber (Cucumis sativus) 500-1300 CE: Two routes to Europe.
.Annals of Botany 109: 117-126

.Parrott, A. 1955. The Tower of Babel. London: SCM Press

Parsons, J. T. 1976. The role of chinampa agriculture in the food supply of Aztec Tenochtitlan. In *Cultural Change and Continuity*, ed.
.C. Clelland, 233-257. New York: Academic Press

Parsons, R. H. 1936. *The Development of Parsons Steam Turbine*.
.London: Constable & Co

Patton, P. 2004. *Bug: The Strange Mutations of the World's Most*
.Famous Automobile. Cambridge, MA: Da Capo Press

Patwhardan, S. 1973. *Change among India's Harijans*. New Delhi:
.Orient Longman

Pearson, P. J. G., and T. J. Foxon. 2012. A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and
.economic transformations. *Energy Policy* 50:117-127

Pentzer, W. T. 1966. The giant job of refrigeration. In *USDA*
.Yearbook, 123-138. Washington, DC: USDA

Perdue, P. C. 1987. *Exhausting the Earth: State and Peasant in*
.Hunan, 1500-1850. Cambridge, MA: Harvard University Press

Perdue, P. C. 2005. *China Marches West: The Qing Conquest of Central Asia*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University
.Press

Perkins, D. S. 1969. *Agricultural Development in China, 1368-1968*.
.Chicago: University of Chicago Press

Perkins, S. 2013. Earth is only just within the Sun's habitable zone.
.Nature

.doi:10.1038/nature.2013.14353

Perlin, J. 2005. *Forest Journey: The Story of Wood and Civilization*. .Woodstock, VT: Countryman Press

Perrodon, A. 1985. Histoire des Grandes Decouvertes Petrolieres. .Paris: Elf Aquitaine

Pessaroff, N. 2002. An electric idea. … Edison's electric pen. Pen .World International 15 (5): 1-4

Pétillon, J.-M., et al. 2011. Hard core and cutting edge: Experimental manufacture and use of Magdalenian composite projectile tips. .Journal of Archaeological Science 38:1266-1283

Petroski, H. 1993. On dating inventions. American Scientist 81:314-.318

.Petroski, H. 2011. Moving obelisks. American Scientist 99:448-451

Pfau, T., et al. 2009. Modern riding style improves horse racing .times. Science 325:289-291

Phocaides, A. 2007. Handbook on Pressurized Irrigation Techniques. .Rome: FAO

Piggott, S. 1983. The Earliest Wheeled Transport. Ithaca, NY: .Cornell University Press

Pimentel, D., ed. 1980. Handbook of Energy Utilization in .Agriculture. Boca Raton, FL: CRC Press

Pinhasi, R., J. Fort, and A. J. Ammerman. 2005. Tracing the origin .and spread of agriculture in Europe. PLoS Biology 3:2220-2228

PISA. 2015. PISA 2012 Results. .http://www.oecd.org/pisa/keyfindings/pisa-2012 -results.htm

Plutarch. 1961. Plutarch's Lives. Trans. B. Perrin. Cambridge, MA: .Harvard University Press

Pobiner, B. L. 2015. New actualistic data on the ecology and energetics of hominin scavenging opportunities. *Journal of Human .Evolution* 80:1-16

Pogue, S. 2012. Use it better: The worst tech predictions of all time. *Scientific American* http://www.scientificamerican.com/article/pogue-al .l-time-worst-tech -predictions

Polimeni, J. M., et al. 2008. *The Jevons Paradox and the Myth of .Resource Efficiency Improvements.* London: Earthscan

Polmar, N. 2006. *Aircraft Carriers: A History of Carrier Aviation and Its Influence on World Events*. Vol. 1., *1909-1945*. Lincoln, NB: .Potomac Press

Polmar, N., and T. B. Allen. 1982. *Rickover: Controversy and Genius*. .New York: Simon and Schuster

Pomeranz, K. 2002. Political economy and ecology on the eve of industrialization: Europe, China, and the global conjuncture. *.American Historical Review* 107:425-446

Ponting, C. 2007. *A New Green History of the World: The Environment and the Collapse of Great Civilizations*. New York: .Penguin Books

Pope, F. L. 1894. *Evolution of the Electric Incandescent Lamp*. New .York: Boschen & Wefer

Pope, S. T. 1923. A study of bows and arrows. *University of California Publications in American Archaeology and Ethnology* .13:329-414

Prager, F. D., and G. Scaglia. 1970. *Brunelleschi: Studies of His Technology and Inventions*. Cambridge, MA: MIT Press.

Pratap, A., and J. Kumar. 2011. *Biology and Breeding of Food Legumes*. Wallingford: CAB.

Price, T. 1991. The Mesolithic of Northern Europe. *Annual Review of Anthropology* 20:211-233.

Price, T. D., and O. Bar-Yosef. 2011. The origins of agriculture: New data, new ideas. *Current Anthropology* 52 (Supplement): S163-S174.

Prigogine, I. 1947. **Étude thermodynamique des phenomenes irreversibles.** Paris: Dunod.

Prigogine, I. 1961. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. New York: Interscience.

Prost, Antoine. 1991. Public and private spheres in France. In *A History of Private Life*, vol. 5, ed. Antoine Prost and Gérard Vincent., 1-103. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.

Protzen, J.-P. 1993. *Inca Architecture and Construction at Ollantaytambo*. Oxford: Oxford University Press.

Pryor, F. L. 1983. Causal theories about the origin of agriculture. *Research in Economic History* 8:93-124.

Pryor, A. J. E., et al. 2013. Plant foods in the Upper Palaeolithic at Dolní Vestonice? Parenchyma redux. *Antiquity* 87 (338): 971-984.

Quick, D. 2012. World record 1,626 miles on one tank of diesel. http://www.gizmag .com/tank-diesel-distance-world-record/22488.

Raepsaet, G. 2008. Land transport, part 2: Riding, harnesses, and vehicles. In *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in*

the Classical World, ed. J. P. Oleson, 580-605. Oxford: Oxford .University Press

Rafiqul, I., et al. 2005. Energy efficiency improvements in ammonia .production: Perspectives and uncertainties. *Energy* 30:2487-2504

Raghavan, B., and J. Ma. 2011. The energy and emergy of the Internet. *Hotnets '11*: 1-6. http://www1.icsi.berkeley.edu/~barath/papers/emer .gy-hotnets11.pdf

Ramelli, A. 1976 (1588). *Le diverse et artificiose machine*. Trans. M. .Teach Gnudi. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press

Ranaweera, M. P. 2004. Ancient stupas in Sri Lanka: Largest brick structure sin the world. *Construction History Society Newsletter* 70:1- .19

Rankine, W. J. M. 1866. *Useful Rules and Tables Relating to Mensuration, Engineering Structures and Machines*. London: G. .Griffin & Co

Rapoport, B. I. 2010. Metabolic factors limiting performance in .marathon runners. *PLoS Computational Biology* 6:1-13

Rappaport, R. A. 1968. *Pigs for the Ancestors*. New Haven, CT: Yale .University Press

Ratcliffe, M. 1985. *Liquid Gold Ships: A History of the Tanker, 1859-* :*1984*. London

.Lloyd's of London Press

Rea, M. S., ed. 2000. *IESNA Handbook*. New York: Illuminating .Engineering Society of North America

Reader, J. 2008. *Propitious Esculent: The Potato in World History*. .New York: Random House

Recht, R. 2008. *Believing and Seeing: The Art of Gothic Cathedrals*. .Chicago: University of Chicago Press

Reid, T. R. 2001. *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution*. New York: Simon and .Schuster

REN21. 2016. *Renewables 2016 Global Status Report*. Paris: REN21. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindin.gs1.pdf

Revel, J. 1979. Capital city's privileges: Food supply in early-modern Rome. In *Food and Drink in History*, ed. R. Foster and O. Ranum, .37-49. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press

Revelle, R., and H. E. Suess. 1957. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of .atmospheric CO_2 during the past decades. *Tellus* 9:18-27

.Reynolds, J. 1970. *Windmills and Watermills*. London: Hugh Evelyn

Reynolds, S. C., and A. Gallagher, eds. 2012. *African Genesis: Perspectives on Hominin Evolution*. Cambridge: Cambridge .University Press

Reynolds, T. S. 1979. Scientific influences on technology: The case of the overshot waterwheel, 1752-1754. *Technology and Culture* .20:270-295

Reynolds, T. S. 1983. *Stronger Than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University .Press

Rhodes, J. A., and S. E. Churchill. 2009. Throwing in the Middle and Upper Paleolithic: inferences from an analysis of humeral .retroversion. *Journal of Human Evolution* 56:1-10

Ricci, M. 2014. *Il genio di Brunelleschi e la costruzione della Cupola*
.di Santa Maria del Fiore. Livorno: Casa Editrice Sillabe

Richerson, P.J., R. Boyd, and R. L. Bettinger. 2001. Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis. *American Antiquity* 66:387-
.411

Richmond, B. G., et al. 2001. Origin of human bipedalism: The knuckle-walking hypothesis revisited. *Yearbook of Physical*
.Anthropology 44:71-105

Rickman, G. E. 1980. The grain trade under the Roman Empire.
.Memoirs from the American Academy in Rome 36:261-276

Riehl, S., M. Zeidi, and N. J. Conard. 2013. Emergence of agriculture
.in the foothills of the Zagros Mountains of Iran. *Science* 341:65-67

Righter, R. W. 2008. *Wind Energy in America: A History*. Norman:
.University of Oklahoma Press

Rindos, D. 1984. *The Origins of Agriculture: An Evolutionary*
.Perspective. Orlando, FL: Academic Press

Robson, G. 1983. *Magnificent Mercedes: The History of the Marque*.
.New York: Bonanza Books

Roche, D. 2000. *A History of Everyday Things: The Birth of Consumption in France, 1600-1800*. Cambridge: Cambridge
.University Press

Rockström, J., et al. 2009. A safe operating space for humanity.
.Nature 461:472- 475

Rogin, L. 1931. *The Introduction of Farm Machinery*. Berkeley:
.University of California Press

Rollins, A. 1983. *The Fall of Rome: A Reference Guide*. Jefferson,
.NC: McFarland & Co

Rolt, L.T.C. 1963. *Thomas Newcomen: The Prehistory of the Steam Engine*. Dawlish: David and Charles.

Rose, D. J. 1974. Nuclear eclectic power. *Science* 184:351-359.

Rosen, W. 2012. *The Most Powerful Idea in the World: The Story of Steam, Industry, and Invention*. Chicago: University of Chicago Press.

Rosenberg, N. 1975. America's rise to woodworking leadership. In *America's Wooden Age: Aspects of Its Early Technology*, ed. B. Hindle, 37-62. Tarrytown, PA: Sleepy Hollow Restorations.

Rosenberg, N., and L. E. Birdzell. 1986. *How the West Grew Rich: The Economic Transformation of the Industrial World*. New York: Basic Books.

Rosenblum, N. 1997. *A World History of Photography*. New York: Abbeville Press.

Rostow, W. W. 1965. *The Stages of Economic Growth*. Cambridge: Cambridge University Press.

Rostow, W. W. 1971. *The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto*. Cambridge: Cambridge University Press.

Rothenberg, B., and F. G. Palomero. 1986. The Rio Tinto enigma—no more. *IAMS* 8:1-6. https://www.ucl.ac.uk/iams/newsletter/accordion/journals/iams_08/iams_8 _1986_rothenberg_palomero.

Rouse, J. E. 1970. *World Cattle*. Norman: University of Oklahoma Press.

Rousmaniere, P., and N. Raj. 2007. Shipbreaking in the developing world: Problems and prospects. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 13:359-368.

Rowland, F. S. 1989. Chlorofluorocarbons and the depletion of .stratospheric ozone. *American Scientist* 77:36-45

Rubio, M., and M. Folchi. 2012. Will small energy consumers be faster in transition? Evidence form early shift from coal to oil in Latin .America. *Energy Policy* 50:50-61

Ruddle, K., and G. Zhong. 1988. *Integrated Agriculture-Aquaculture .in South China*. Cambridge: Cambridge University Press

Ruff, C. B., et al. 2015. Gradual decline in mobility with the adoption of food production in Europe. *Proceedings of the National Academy .of Sciences of the United States of America* 112:7147-7152

RWEDP (Regional Wood Energy Development Programme in Asia). 1997. *Regional Study of Wood Energy Today and Tomorrow*. Rome: .FAO-RWEDP. http://www.rwedp

.org/fd50.html

Ryder, H. W., H. J. Carr, and P. Herget. 1976. Future performance in .footracing. *Scientific American* 224 (6): 109-119

Sagui, C. L. 1948. Le meunerie de Barbegal (France) et les roués .hydrauliques les ancients et au moyen âge. *Isis* 38:225-231

.Sahlins, M. 1972. *Stone Age Economics*. Chicago: Aldine

Salkield, L. U. 1970. Ancient slags in the wouth west of the Iberian Peninsula. Paper presented at the Sixth International Mining .Congress, Madrid, June 1970

Salzman, P. C. 2004. *Pastoralists: Equality, Hierarchy, and the State*. .Boulder, CO: Westview Press

Samedov, V.A. 1988. *Neft' i ekonomika Rossii: 80-90e gody XIX .veka*. Baku: Elm

Sanders, W. T., J. R. Parsons, and R. S. Santley. 1979. *The Basin of Mexico: Ecological Processes in the Evolution of a Civilization*. New .York: Academic Press

Sanz, M., J. Call, and C. Boesch, eds. 2013. *Tool Use in Animals: .Cognition and Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press

Sarkar, D. 2015. *Thermal Power Plant: Design and Operation*. .Amsterdam: Elsevier

Sasada, T., and A. Chunag. 2014. Irom smelting in the nomadic empire of Xiongnu in ancient Mongolia. *ISIJ International* 54:1017-.1023

Savage, C. I. 1959. *An Economic History of Transport*. London: .Hutchinson

Schlebecker, J. T. 1975. *Whereby We Thrive*. Ames: Iowa State .University Press

Schmidt, M. J. 1996. Working elephants. *Scientific American* 274 (1): .82-87

Schmidt, P., and D. H. Avery. 1978. Complex iron smelting and .prehistoric culture in Tanzania. *Science* 201:1085-1089

Schobert, H. H. 2014. *Energy and Society: An Introduction*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Schram, W. D. 2014. Greek and Roman Siphons. http://www.romanaqueducts.info/ siphons/siphons.htm.

Schumpeter, J. A. 1939. *Business Cycle: A Theoretical and Statistical Analysis of the Capitalist Processes*. New York: McGraw-Hill.

Schurr, S. H., and B. C. Netschert. 1960. *Energy in the American Economy 1850-1975*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.

Schurr, S. H., et al. 1990. *Electricity in the American Economy: Agent of Technological Progress*. New York: Greenwood Press.

Schurz, W. L. 1939. *The Manila Galleon*. New York: E. P. Dutton.

Scott, D. A. 2002. *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.

Scott, R. A. 2011. Gothic Enterprise A Guide to Understanding the Medieval Cathedral. Berkeley: University of California Press.

Seaborg, G. T. 1972. Opening Address. In Peaceful Uses of Atomic Energy: Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 29-35. New York: United Nations.

Seavoy, R. E. 1986. Famine in Peasant Societies. New York: Greenwood Press. Seebohm, M. E. 1927. The Evolution of the English Farm. London: Allen & Unwin.

comte de Ségur, P.-P. 1825. History of the Expedition to Russia, Undertaken by Emperor Napoleon, in the Year 1812. London: Treuttel and Würtz.

Self. 2015. Nuts, brazilnuts. Dried, unblanched. Self.com. .http://nutritiondata.self .com/facts/nut-and-seed-products/3091/2

Sellin, H. J. 1983. The large Roman water mill at Barbégal (France). .History and Technology 8:91-109

Senancour, E. P. 1901 (1804). Obermann. Trans. J. D. Frothingham. .Cambridge: Riverside Press

Sexton, A. H. 1897. Fuel and Refractory Materials. London: Vlackie .and Son

Sharma, R. 2012. Wheat Cultivation Practices: With Special Reference to Nitrogen and Weed Management. Saarbrücken: LAP .Lambert Academic Publishing

Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. Bell .System Technical Journal 27:379-423, 623-656

Sheehan, G. W. 1985. Whaling as an organizing focus in Northwestern Eskimo society. In Prehistoric Hunter-Gatherers, ed. T. .D. Price and J. A. Brown, 123-154. Orlando, FL: Academic Press

Sheldon, C. D. 1958. The Rise of the Merchant Class in Tokugawa .Japan, 1600-1868: An Introductory Survey. New York: J. J. Augustin

Shen, T. H. 1951. Agricultural Resources of China. Ithaca, NY: .Cornell University Press

Shift Project. 2015. Redesigning Economy to Achieve Carbon .Transition. http:// www.theshiftproject.org

Shockley, W. 1964. Transistor technology evokes new physics. In .Nobel Lectures: Physics 1942-1962, 344-374. Amsterdam: Elsevier

Shulman, P. A. 2015. Coal and Empire: The Birth of Energy Security in Industrial America. Baltimore, MD: Johns Hopkins University .Press

Sieferle, R. P. 2001. The Subterranean Forest. Cambridge: White .Horse Press

Siemens, C. W. 1882. Electric lighting, the transmission of force by .electricity. Nature 27:67-71

Sierra-Macías, M., et al. 2010. Caracterización agronómica, calidad industrial y nutricional de maíz para el trópico mexicano. *Agronomía .Mesoamericana* 21:21-29

Sillitoe, P. 2002. Always been farmer-foragers? Hunting and gathering in the Papua New Guinea Highlands. *Anthropological .Forum* 12:45-76

Silver, C. 1976. *Guide to the Horses of the World*. Oxford: Elsevier .Phaidon

Simons, G. 2014. *Comet! The World's First Jet Airliner*. Barnsley: .Pen and Sword Books

Singer, C. et al., eds. 1954-1958. *A History of Technology*. 5 .volumes. Oxford: Oxford University Press

Singer, J. D., and M. Small. 1972. *The Wages of War 1816-1965: A .Statistical Handbook*. New York: John Wiley

Sinor, D. 1999. The Mongols in the West. *Journal of Asian History* .33:1-44

Sittauer, H. L. 1972. *Gebändigte Explosionen*. Berlin: Transpress .Verlag für Verkehrswesen

Sitwell, N. H. 1981. *Roman Roads of Europe*. New York: St. Martin's .Press

Siuru, B. 1989. Horsepower to the people. *Mechanical Engineering .(New York)* 111 (2): 42-46

Skilton, C. P. 1947. *British Windmills and Watermills*. London: .Collins

Slicher van Bath, B. H. 1963. *The Agrarian History of Western .Europe, A.D. 500-1850*. London: Arnold

Smeaton, J. 1759. An experimental enquiry concerning the natural power of water and wind to turn mills, and other machines, depending on a circular motion. *Philosophical Transactions of the .Royal Society of London* 51:100-174

.Smil, V. 1976. *China's Energy*. New York: Praeger

.Smil, V. 1981. China's food. *Food Policy* 6:67-77

.Smil, V. 1983. *Biomass Energies*. New York: Plenum Press

Smil, V. 1985. *Carbon Nitrogen Sulfur: Human Interference in Grand .Biospheric Cycles*. New York: Plenum Press

Smil, V. 1987. *Energy Food Environment*. Oxford: Oxford University .Press

Smil, V. 1988. *Energy in China's Modernization*. Armonk, NY: M. E. .Sharpe

.Smil, V. 1991. *General Energetics*. New York: John Wiley

.Smil, V. 1994. *Energy in World History*. Boulder, CO: Westview

.Smil, V. 1997. *Cycles of Life*. New York: Scientific American Library

Smil, V. 2000a. Energy in the twentieth century: Resources, conversions, costs, uses, and consequences. *Annual Review of .Energy and the Environment* 25:21-51

.Smil, V. 2000b. *Feeding the World*. Cambridge, MA: MIT Press

.Smil, V. 2000c. Jumbo. *Nature* 406:239

Smil, V. 2001. Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production. Cambridge, MA: MIT .Press

Smil, V. 2003. Energy at the Crossroads: Global Perspectives and .Uncertainties. Cambridge, MA: MIT Press

Smil, V. 2004. War and energy. In Encyclopedia of Energy, ed. C. .Cleveland et al., vol. 6, 363-371. Amsterdam: Elsevier

Smil, V. 2005. Creating the Twentieth Century: Technical Innovations of 1867-1914 and Their Lasting Impact. New York: Oxford University .Press

Smil, V. 2006. Transforming the Twentieth Century: Technical Innovations and Their Consequences. New York: Oxford University .Press

Smil, V. 2008a. Energy in Nature and Society: General Energetics of .Complex Systems. Cambridge, MA: MIT Press

Smil, V. 2008b. Global Catastrophes and Trends. Cambridge, MA: .MIT Press

.Smil, V. 2008c. Oil. Oxford: Oneworld Press

Smil, V. 2010a. Energy Transitions: History, Requirements, .Prospects. Santa Barbara, CA: Praeger

Smil, V. 2010b. Prime Movers of Globalization: The History and .Impact of Diesel Engines and Gas Turbines. Cambridge: MIT Press

Smil, V. 2010c. Why America Is Not a New Rome. Cambridge, MA: .MIT Press

Smil, V. 2013a. Harvesting the Biosphere: What We Have Taken .from Nature. Cambridge, MA: MIT Press

Smil, V. 2013b. Just how polluted is China, anyway? The American, .January 31, 2013

http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/smail .article-20130131.pdf-

Smil, V. 2013c. Made in the USA: The Rise and Retreat of American .Manufacturing. Cambridge, MA: MIT Press

.Smil, V. 2013d. Should We Eat Meat? Chichester: Wiley Blackwell

Smil, V. 2014a. Fifty years of the Shinkansen. Asia-Pacific Journal: Japan Focus, December 1, 2014. http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/shin .kansen.pdf

Smil, V. 2014b. Making the Modern World: Materials and .Dematerialization. Chichester: Wiley

Smil, V. 2015a. Natural Gas: Fuel for the 21st Century. Chichester: .Wiley

Smil, V. 2015b. Power Density: A Key to Understanding Energy .Sources and Uses. Cambridge, MA: MIT Press

Smil, V. 2015c. Real price of oil. IEEE Spectrum 26 (October). .http://www.vaclavsmil .com/wp-content/uploads/10.OIL_.pdf

Smil, V. 2016. Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World. .Amsterdam: Elsevier

Smith, K. 2013. Biofuels, Air Pollution, and Health: A Global Review. .Berlin: Springer

Smith, K. P., and A. Anilkumar. 2012. Rice Farming. Saarbrücken: .Lambert Academic Publishing

Smith, N. 1980. The origins of the water turbine. Scientific American .242 (1): 138-148

Smith, P. C. 2015. Mitsubishi Zero: Japan's Legendary Fighter. .Barnsley: Pen & Sword Books

Smith, N. 1978. Roman hydraulic technology. Scientific American .238:154-161

Smythe, R. H. 1967. The Structure of the Horse. London: J. A. Allen .& Co

Sobel, D. 1995. Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time. New York: .Penguin

Sockol, M. D., D. A. Raichlen, and H. Pontzer. 2007. Chimpanzee locomotor energetics and the origin of human bipedalism. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United .States of America 104:12265-12269

Soddy, F. 1933. Money versus Man: A Statement of the World Problem from the Standpoint of the New Economics. New York: E. P. .Dutton

Soedel, W., and V. Foley. 1979. Ancient catapults. Scientific .American 240 (3): 150-160

Solomon, B. D., J. R. Barnes, and K. E. Halvorsen. 2007. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. Biomass .and Bioenergy 31:416-425

Solomon, F., and R. Q. Marston, eds. 1986. The Medical Implications .of Nuclear War. Washington, DC: National Academies Press

Sørensen, B. 2011. History of Energy: Northern Europe from the .Stone Age to the Present Day. London: Routledge

Speer, A. 1970. Inside the Third Reich: Memoirs. New York: .Macmillan

Spence, K. 2000. Ancient Egyptian chronology and the astronomical .orientation of pyramids. Nature 408:320-324

Spencer, J. E. 1966. Shifting Cultivation in Southeastern Asia. .Berkeley: University of California Press

Spinardi, G. 2008. From Polaris to Trident: The Development of US Fleet Ballistic Missile Technology. Cambridge: Cambridge University .Press

Sponheimer, M., et al. 2013. Isotopic evidence of early hominin diets. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United .States of America 110:10513-10518

Sprague, G. F., and J. W. Dudley, eds. 1988. Corn and Corn .Improvement. Madison, WI: American Society of Agronomy

Spring-Rice, M. 1939. Working-Class Wives. Hardmonsworth: .Penguin

Spruytte, J. 19837. Études expérimentales sur l'attelage: .Contribution à l'histoire du cheval. Paris: Crépin-Lebond

Stanhill, G. 1976. Trends and deviations in the yield of the English .wheat crop during the last 750 years. *Agro-ecosystems* 3:1-10

Stanley, W. 1912. Alternating-current development in America. .*Journal of the Franklin Institute* 173:561-580

Starbuck, A. 1878. *History of the American Whale Fishery*. Waltham, .MA: A. Starbuck

Stearns, P. N. 2012. *The Industrial Revolution in World History*. .Boulder, CO: Westview Press

Stern, D. I. 2004. Economic growth and energy. In *Encyclopedia of .Energy*, ed. C. Cleveland et al., vol. 2, 35-51. Amsterdam: Elsevier

Stern, D. I. 2010. *The Role of Energy in Economic Growth*. .Canberra: Australian National University

Stewart, I., D. De, and A. Cole. 2015. Technology and people: The great job-creating machine. Deloitte. http://www2.deloitte.com/uk/en/pages/finance/artic .les/technology -and-people.html

Stockholm Resilience Center. 2015. The nine planetary boundaries. http://www .stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/planetary-boundaries/ about-the-research/the-nine-planetary-boundaries.h .tml

Stockhuyzen, F. 1963. *The Dutch Windmill*. New York: Universe .Books

Stoltzenberg, D. 2004. *Fritz Haber: Chemist, Nobel Laureate,* .*German, Jew*. Philadelphia: Chemical Heritage Press

.Stopford, M. 2009. *Maritime Economics*. London: Routledge

.Straker, E. 1969. *Wealden Iron*. New York: Augustus M. Kelley

Strauss, L. L. 1954. Speech to the National Association of Science Writers, New York City, September 16. Cited in *New York Times*, .September 17, 5

Stross, R. E. 1996. *The Microsoft Way: The Real Story of How the* .*Company Outsmarts its Competition*. Reading, MA: Addison-Wesley

Subcommittee on Horse Nutrition. 1978. *Nutrient Requirements of* .*Horses*. Washington, DC: NAS

Sullivan, R. J. 1990. The revolution of ideas: Widespread patenting and invention during the English Industrial Revolution. *Journal of* .*Economic History* 50:349-362

Swade, D. 1991. *Charles Babbage and His Calculating Engines*. .London: Science Museum

Taeuber, I. B. 1958. *The Population of Japan*. Princeton, NJ: .Princeton University Press

Tainter, J. A. 1988. *The Collapse of Complex Societies*. New York: .Cambridge University Press

Takamatsu, N., et al. 2014. Steel recycling circuit in the world. *Tetsu* .*To Hagane* 100:740-749

Tanaka, Y. 1998. The cyclical sensibility of Edo-period Japan. *Japan* .*Echo* 25 (2): 12-16

Tata Steel. 2011. Tata Steel announces completion of 100 years of its A-F Blast Furnace's existence. http://www.tatasteel.com/UserNewsRoom/usershowcontent.asp?id =785&type=PressRelease&REFERER=http://www.tatastee .l.com/media/press-release .asp

Tate, K. 2009. America's Moon Rocket Saturn V. http://www.space.com/18422 -apollo-saturn-v-moon-rocket-nasa- .infographic.html

.Tauger, M. B. 2010. *Agriculture in World History*. London: Routledge

Taylor, A. 2013. A luxury car club is stirring up class conflict in China. http://www .businessinsider.com/chinas-sports-car-club-envy-2 .013-4

Taylor, C. F. 1984. *The Internal-Combustion Engine in Theory and* .*Practice*. Cambridge, MA: MIT Press

Taylor, G. R., ed. 1982. *The Inventions That Changed the World*. .London: Reader's Digest Association

Taylor, M. J. H., ed. 1989. *Jane's Encyclopedia of Aviation*. New York: Portland House.

Taylor, F. S. 1972. *A History of Industrial Chemistry*. New York: Arno Press.

Taylor, F. W. 1911. *Principles of Scientific Management*. New York: Harper & Brothers.

Taylor, N. A. S. 2006. Ethnic differences in thermoregulation: Genotypic versus phenotypic heat adaptation. *Journal of Thermal Biology* 31:90-104.

Taylor, N. A. S., and C. A. Machado-Moreira. 2013. Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans. *Extreme Physiology & Medicine* 2:1-29.

Taylor, R. 2007. The polemics of eating fish in Tasmania: The historical evidence revisited. *Aboriginal History* 31:1-26.

Taylor, T. S. 2009. *Introduction to Rocket Science and Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Telleen, M. 1977. *The Draft Horse Primer*. Emmaus, PA: Rodale Press.

Termuehlen, H. 2001. *100 Years of Power Plant Development*. New York: ASME Press.

Tesla, N. 1888. *Electro-magnetic Motor. Specification forming part of Letters Patent No. 391,968, dated May 1, 1888*. Washington, DC: U.S. Patent Office. http://www.uspto .gov.

Testart, A. 1982. The significance of food storage among hunter-gatherers: Residence patterns, population densities, and social inequalities. *Current Anthropology* 23:523-537.

Thieme, H. 1997. Lower Paleolithic hunting spears from Germany. .*Nature* 385:807-810

Thomas, B. 1986. Was there an energy crisis in Great Britain in the .17th century? *Explorations in Economic History* 23:124-152

Thomas Edison Papers. 2015. Edison's patents. .http://edison.rutgers.edu/patents .htm

Thompson, W. C. 2002. *Thompson Releases Report on Fiscal* .*Impact of 9/11 on New York City*. New York: NYC Comptroller

Thomsen, C. J. 1836. *Ledetraad til nordisk oldkyndighed*. .Copenhagen: L. Mellers

Thomson, K. S. 1987. How to sit on a horse. *American Scientist* .75:69-71

Thomson, E. 2003. *The Chinese Coal Industry: An Economic* .*History*. London: Routledge

Thomson, W. 1896. Letter to Major Baden Baden-Powell, December 8, 1896. *Correspondence of Lord Kelvin*. http://zapatopi.net/kelvin/papers/letters.html#bad .en -powell

Thoreau, H. D. 1906. *The Journal of Henry David Thoreau, 1837-* .*1861*. Boston: Houghton-Mifflin

Thrupp, L. A., et al. 1997. *The Diversity and Dynamics of Shifting Cultivation: Myths, Realities, and Policy Implications*. Washington, .DC: World Resources Institute

Thurston, R. H. 1878. *A History of the Growth of the Steam-Engine*. .New York: D. Appleton Co

Titow, J. Z. 1969. *English Rural Society, 1200-1350*. London: George .Allen and Unwin

Tomaselli, I. 2007. *Forests and Energy in Developing Countries*. Rome: FAO.

Tomlinson, R. 2002. The invention of e-mail just seemed like a neat idea. SAP INFO. http://www.sap.info.

Tompkins, P. 1971. *Secrets of the Great Pyramid*. New York: Harper & Row.

Tompkins, P. 1976. *Mysteries of Mexican Pyramids*. New York: Harper & Row.

Torii, M. 1995. Maximal sweating rate in humans. *Journal of Human Ergology* 24:137-152.

Torr, G. 1964. *Ancient Ships*. Chicago: Argonaut Publishers.

Torrey, V. 1976. *Wind-Catchers: American Windmills of Yesterday and Tomorrow*. Brattleboro, VT: Stephen Greene Press.

Tresemer, D. 1996. *The Scythe Book*. Chambersburg, PA: Alan C. Hood.

Trinkaus, E. 1987. Bodies, brawn, brains and noses: Human ancestors and human predation. In *The Evolution of Human Hunting*, ed. M. Nitecki and D. V. Nitecki, 107-145. New York: Plenum.

Trinkaus, E. 2005. Early modern humans. *Annual Review of Anthropology* 34:207-230.

TsSU (Tsentral’noie statisticheskoie upravlenie). 1977. *Narodnoie khoziaistvo SSSR za 60 let*. Moscow: Statistika.

Turner, B. L. 1990. The rise and fall of population and agriculture in the Central Maya Lowlands 300 B.C. to present. In *Hunger in History*, ed. L. F. Newman, 78-211. Oxford: Blackwell.

Tvengsberg, P. M. 1995. Rye and swidden cultivation. *Tools and Tillage* 7:131-146.

Tyne Built Ships. 2015. *Glückauf*. http://www.tynebuiltships.co.uk/G-.Ships/ gluckauf1886.html

UNDP (United Nations Development Programme). 2015. *Human .Development Report 2015*. New York: UNDP

UNESCO. 2015a. Head-Smashed-In Buffalo Jump. .http://whc.unesco.org/en/list/ 158

UNESCO. 2015b. Mount Qingcheng and Dujianyang Irrigation .System. http://whc .unesco.org/en/list/1001

Unger, R. 1984. Energy sources for the Dutch Golden Age. .*Research in Economic History* 9:221-253

United Nations Organization. 1956. World energy requirements in 1975 and 2000. In *Proceedings of the International Conference on .the Peaceful Uses of Atomic Energy*, vol. 1, 3-33. New York: UNO

Upham, C. W., ed. 1851. *The life of General Washington: First President of the United States*. vol. 2. London: National Illustrated .Library

Urbanski, T. 1967. *Chemistry and Technology of Explosives*. New .York: Pergamon Press

U.S. Strategic Bombing Survey. 1947. *Effects of Air Attack on Urban Complex TokyoKawasaki-Yokohama*. Washington, DC: U.S. .Strategic Bombing Survey

USBC (U.S. Bureau of the Census). 1954. *U.S. Census of .Manufacturers: 1954*. Washington, DC: U.S. GPO

USBC. 1975. *Historical Statistics of the United States: Colonial .Times to 1970*. Washington, DC: USBC

U.S. Centennial of Flight Commission. 2003. *History of Flight*. .Washington, DC

U.S. Centennial of Flight Commission. .http://www.centennialofflight.gov/hof/ index.htm

USDA (U.S. Department of Agriculture). 1959. *Changes in Farm .Production and Efficiency*. Washington, DC: USDA

USDA. 2011. *National Nutrient Database for Standard Reference* . .http://ndb.nal.usda .gov

USDA. 2014. *Multi-Cropping Practices: Recent Trends in Double .Cropping*. Washington, DC: USDA

USDOE (U.S. Department of Energy). 2011. *Biodiesel Basics*. .http://www.afdc.energy .gov/pdfs/47504.pdf

USDOE. 2013. Energy efficiency of LEDs. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/ .publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf

USDOL (U.S. Department of Labor). 2015. Employment by major .industry sector. http://www.bls.gov/emp/ep_table_201.htm

USEIA (U.S. Energy Information Agency). 2014. Consumer energy expenditures are roughly 5% of disposable income, below long-term .average. http://www.eia.gov/ todayinenergy/detail.cfm?id=18471

.USEIA. 2015a. *Annual Coal Report*. http://www.eia.gov/coal/annual

USEIA. 2015b. China. http://www.eia.gov/beta/international/analysis.cf .m?iso=CHN

USEIA. 2015c. *Direct Federal Financial Interventions and Subsidies in Energy in Fiscal Year 2013.* Washington, DC: USEIA. .http://www.eia.gov/analysis/requests/subsidy

USEIA. 2015d. Energy intensity. http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3 .cfm? .tid=92&pid=46&aid=2

.USEIA. 2016a. Coal. http://www.eia.gov/coal

USEIA. 2016b. U.S. imports from Iraq of crude oil and petroleum products. https:// www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s .mttimiz1&f=a=

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2004. Photochemical smog. http://www.epa.sa.gov.au/files/8238_info_photosmog .pd.

USEPA. 2015. *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2015*. https://www3.epa.gov/fueleconomy/fetrends/ 1975- .2015/420r15016.pdf

USGS (U.S. Geological Survey). 2015. Commodity statistics and .information. http:// minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity

Usher, A. P. 1954. *A History of Mechanical Inventions*. Cambridge, .MA: Harvard University Press

Utley, F. 1925. *Trade Guilds of the Later Roman Empire*. London: .London School of Economics

Van Beek, G. W. 1987. Arches and vaults in the ancient Near East. .*Scientific American* 257 (2): 96-103

van Duijn, J. J. 1983. *The Long Wave in Economic Life*. London: .George Allen & Unwin

Van Noten, F., and J. Raymaekers. 1988. Early iron smelting in .Central Africa. *Scientific American* 258:104-111

Varvoglis, H. 2014. *History and Evolution of Concepts in Physics*. .Berlin: Springer

Vasko, T., R. Ayres, and L. Fontvieille, eds. 1990. *Life Cycles and* .*Long Waves*. Berlin: Springer-Verlag

Vavilov, N. I. 1951. *Origin, Variation, Immunity and Breeding of* .*Cultivated Plants*. Waltham, MA: Chronica Botanica

Veraverbeke, W. S., and J. A. Delcour. 2002. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *Critical Reviews in Food Science and* .*Nutrition* 42:179-208

.Versatile. 2015. Versatile. http://www.versatile-ag.ca

Vikingeskibs Museet. 2016. Wool sailcloth. http://www.vikingeskibsmuseet.dk/ en/professions/boatyard/experimental-archaeologica .l-research/maritime-crafts/ maritime-technology/woollen-sailcloth

Ville, S. P. 1990. *Transport and the Development of European* .*Economy, 1750-1918*. London: Macmillan

Villiers, G. 1976. *The British Heavy Horse*. London: Barrie and .Jenkins

Vogel, H. U. 1993. The Great Wall of China. *Scientific American* 268 .(6): 116-121

Volkswagen, A. G. 2013. Ivan Hirst. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/ info_center/en/publications/2013/11/ivan_hirst.bin html/binarystorageitem/file/ VWAG_HN_4_Ivan-Hirst-. .eng_2013_10_18.pdf

von Bertalanffy, L. 1968. *General System Theory*. New York: George .Braziller

von Braun, W., and F. I. Ordway. 1975. *History of Rocketry and* .*Space Travel*. New York: Thomas Y. Crowell

von Hippel, Frank, et al. 1988. Civilian casualties from counterforce .attacks. *Scientific American* 259 (3): 36-42

von Tunzelmann, G. N. 1978. *Steam Power and British* .*Industrialization to 1860*. Oxford: Clarendon Press

Wailes, R. 1975. *Windmills in England: A Study of Their Origin,* .*Development and Future*. London: Architectural Press

Waldron, A. 1990. *The Great Wall of China*. Cambridge: Cambridge .University Press

Walther, R. 2007. *Pechelbronn: A la source du pétrole, 1735-1970*. .Strasbourg: Hirlé

Walton, S. A., ed. 2006. *Wind and Water in the Middle Ages: Fluid Technologies from Antiquity to the Renaissance*. Tempe: Arizona .Center for Medieval and Renaissance Studies

Walz, W., and H. Niemann. 1997. *Daimler-Benz: Wo das Auto* .*Anfing*. Konstanz: Verlag Stadler

Wang, Z. 1991. *A History of Chinese Firearms*. Beijing: Military .Science Press

War Chronicle. 2015. Estimated war dead World War II. .http://warchronicle.com/ numbers/WWII/deaths.htm

.Warburton, M. 2001. Barefoot running. *Sportscience* 5 (3): 1-4

Warde, P. 2007. *Energy Consumption in England and Wales, 1560-* .*2004*. Naples: Consiglio Nazionale della Ricerche

Warde, P. 2013. The first industrial revolution. In *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries*, ed. A. Kander, P. Malanima, and P. Warde, 129-247. Princeton, NJ: .Princeton University Press

Washlaski, R. A. 2008. Manufacture of Coke at Salem No. 1 Mine Coke Works. http://patheoldminer.rootsweb.ancestry.com/coke2.h .tml

Waterbury, J. 1979. *Hydropolitics of the Nile Valley*. Syracuse, NY: .Syracuse University Press

Watkins, G. 1967. Steam power—an illustrated guide. *Industrial .Archaeology* 4 (2): 81-110

Watt, J. 1855 (1769). *Steam Engines, &c. 29 April 1769.* Patent reprint by G. E. Eyre and W. Spottiswoode. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0 .d/ James_Watt_Patent_1769_No_913.pdf

Watters, R. F. 1971. *Shifting Cultivation in Latin America*. Rome: .FAO

Watts, P. 1905. *The Ships of the Royal Navy as They Existed at the .Time of Trafalgar*. London: Institution of Naval Architects

Wei, J. 2012. *Great Inventions that Changed the World*. Hoboken, .NJ: Wiley

Weissenbacher, M. 2009. *Sources of Power: How Energy Forges .Human History*. Santa Barbara, CA: Praeger

Weisskopf, V. F. 1983. Los Alamos anniversary: "We meant so well." .*Bulletin of the Atomic Scientists,* August-September, 24-26

Weller, J. A. 1999. Roman traction systems. .http://www.humanist.de/rome/rts

Welsch, R. L. 1980. No fuel like an old fuel. *Natural History* 89 (11): .76-81

Wendel, J. F., et al. 1999. Genes, jeans, and genomes: Reconstructing the history of cotton. In *Seventh International Symposium of the International-Organization-of-*

PlantBiosystematists, ed. L. W. D. VanRaamsdonk and J. C. M. DenNijs, 133-159.

Wesley, J. P. 1974. *Ecophysics*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.

Whaples, R. 2005. Child Labor in the United States. *EH.Net Encyclopedia* http:// eh.net/encyclopedia/child-labor-in-the-united-states.

Wheat Foods Council. 2015. Wheat facts. http://www.wheatfoods.org/resources/72.

Whipp, B. J., and K. Wasserman. 1969. Efficiency of muscular work. *Journal of Applied Physiology* 26:644-648.

White, A. 2007. A global projection of subjective well-being: A challenge to positive psychology? *Psychtalk* 56:17-20.

White, K. D. 1967. *Agricultural Implements of the Roman World*. Cambridge: Cambridge University Press.

White, K. D. 1970. *Roman Farming*. London: Thames & Hudson.

White, K. D. 1984. *Greek and Roman Technology*. Ithaca, NY: Cornell University Press.

White, L. A. 1943. Energy and the evolution of culture. *American Anthropologist* 45:335-356.

White, L. 1978. *Medieval Religion and Technology*. Berkeley: University of California Press.

White, P., and T. Denham, eds. 2006. *The Emergence of Agriculture: A Global View*. London: Routledge.

Whitmore, T. M., et al. 1990. Long-term population change. In *The Earth as Transformed by Human Action*, ed. B. L. Turner II et al., 25-39. Cambridge: Cambridge University Press.

WHO (World Health Organization). 2002. *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition*. Geneva: WHO.

WHO. 2015a. Life expectancy. http://apps.who.int/gho/data/node.main.688.

WHO. 2015b. Road traffic injuries. http://www.who.int/mediacentre/factsheets/ fs358/en.

Wier, S. K. 1996. Insight from geometry and physics into the construction of Egyptian Old Kingdom pyramids. *Cambridge Archaeological Journal* 6:150-163.

Wikander, Ö. 1983. *Exploitation of Water-Power or Technological Stagnation?* Lund: CWK Gleerup.

Wilkins, J., et al. 2012. Evidence for early hafted hunting technology. *Science* 338:942-946.

Williams, M. 2006. *Deforesting the Earth :From Prehistory to Global Crisis*. Chicago:

Chicago University Press.

Williams, M. R. 1997. *History of Computing Technology*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.

Williams, T. 1987. *The History of Invention: From Stone Axes to Silicon Chips*. New York: Facts on File.

Wilson, A. M. 1999. Windmills, cattle and railroad: The settlement of the Llano Estacado. *Journal of the West* 38 (1): 62-67.

Wilson, A. M. et al. 2001. Horses damp the spring in their step. *Nature* 414:895-899.

Wilson, C. 1990. *The Gothic Cathedral: The Architecture of the Great Church 1130- 1530*. London: Thames and Hudson.

Wilson, C. 2012. Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies. *Energy Policy* 50:81-94.

Wilson, D. G. 2004. *Bicycling Science*. Cambridge, MA: MIT Press.

Winkelmann, R., et al. 2015. Combustion of available fossil fuel resources sufficient to eliminate the Antarctic Ice Sheet. *Science Advances* 1:e1500589.

الكشاف

ثبت المصطلحات

Accelerating charges	الشحنات المتسارعة
Accident	حادث
Acheulean stone tools	أدوات حجرية أتشيولية
Acorn	البلوط
Agriculture	الزراعة
Agronomic	الممارسات الزراعية
Agropastoralism	الزراعة الرعوية
Allometric	العلاقة بين شكل الجسم وسلوكه
Alternating current	التيار المتناوب
Aluminum	الألومنيوم
Animal feeding	علف الحيوانات

Animate energy	الطاقة الحية
Aqueduct	قناة الماء
Arboreal	يعيش في الأشجار
Architrave	النجفة فوق الباب
Ardipithecus ramidus	أرديبيثيكوس راميدوس
Ards	المعزقة، المجرفة
Arrows	السهام
Assembly line	خط التجميع
Atmosphere	الغلاف الجوي
Australopithecus afarensis	أسترالوبيثيكوس أفارنسي
Australopithecus anamensis	أوسترالوبيثيكوس أنامنسيس
Australopithecus deyiremeda	أسترالوبيثيكوس ديريميدا
Batten	القلادة

BCE	قبل المسيح
Beam	عاتق، عارضة خشبية
Biomass fuel	وقود الكتلة الحيوية
Biomass	الكتلة الحيوية
Biosphere	المحيط الحيوي
Bipedal	ثنائيات الأرجل
Bituminous coal	فحم البيتومين
Blight	آفة زراعية
Blubber	دهن الحوت
Blubbery	سمين
Bog	مستنقع
Boiling	الغليان
Boreal	تابعة للمناخ الجنوبي

Bowsprit	الدقل، العمود الأمامي
Brain	المخ (الدماغ)
Brazier	مدفأة الكانون
Bricks	الطوب
Bridges	الجسور
Brine	ماء شديد الملوحة
Bucket	السطل
Calculus	حصاة المثانة أو الكلية
Candles	الشموع
Cannon	المدفع
Canter	مشي الفرس
Capstans	عجلات الدوس
Carbohydrates	المواد الكربوهيدراتية

Carbon dioxide	ثاني أكسيد الكربون
Carbon monoxide	أول أكسيد الكربون
Carnivores	آكلات اللحم
Carp	سمك الشبوط
Cast	الصب
Catapult	المنجنيق
Cavalry	الفرسان
Cement	الإسمنت
Cereals	الحبوب
Chaff	العصافة، قشر القمح
Charcoal	فحم الخشب
Charcoaling	صناعة الفحم الحجري
Chemical	مادة كيميائية

Chemiluminescence	التألق الكيميائي
Chips	الشظايا
Chiromancy	قراءة الكف
Civilization	الحضارة
Clover	البرسيم
Coeval	مماثل عمرا
Collar	طوق العنق
Combine	الحصادة الدراسة
Combustion	الاحتراق
Common denominator	العامل المشترك
Compost	مزيج من الروث وأوراق الشجر
Consumption	استهلاك
Conversion	تحويل

Converter	محول
Cooking efficiency	كفاءة الطبخ
Cooking	الطبخ
Copious	غزير، وافر
Coulter	حديدة المحراث القاطعة
Crane	مرفاع
Crassulacean acid metabolism	استقلاب حمض المخلدات الكراسولاسي
Crassulacean acid	حمض المخلدات الكراسولاسي
Cropping	زراعة المحاصيل
Crops	المحاصيل
Crossbow	القوس
Cultivar	صنف مزروع
Cultivation	الزراعة

Cycles	الدورات
Dereliction	إهمال، تقصير
Diesel	ديزل (المازوت)
Direct current	التيار المستمر
Dissociation by radiolysis	التحليل الكهربائي
Diurnal	نهاري
Domestication	تدجين، استئناس
Dorsoventral	ظهري - بطني
Draft animals	حيوانات الجر
Drainage	الصرف، التجفيف
Driftwood	خشب طاف على الماء
Dynasties	الأسر
Eccrine	منتح، مفرز

English	Arabic
Ecosystem	النظام البيئي
Edison’s system	نظام إديسون
Electric motors	المحركات الكهربائية
Electrical energy	الطاقة الكهربائية
Electrification	تزويد بالكهرباء
Electromagnetic	كهرطيسي
Emission	الانبعاث
Encephalizational quotient	حجم الدماغ
Endocarp	غلاف الثمرة الداخلي
Energy conversion	تحول الطاقة
Energy cost	تكلفة الطاقة
Energy density	كثافة الطاقة
Energy inputs	مدخلات الطاقة

Energy intensity	شدة الطاقة
Energy returns	عائدات الطاقة
Engine	المحرك
Entropy	تراجع متدرج
Equability	اطراد، رصانة
Equable	مستو، رصين
Equatorward	باتجاه خط الإستواء
Ethanol	الإيثانول
Eucalyptus	شجر الكافور
Evanescent	مؤقت
Evolution	النشوء، الارتقاء
Explosives	المتفجرات
Extrasomatic	خارج الجسم

Fallow	إراحة الأرض
Famine	مجاعة
Fantail	ذيل مروحي
Fertilizer	السماد
Filament	الشعرة المضيئة
Fireplace	الموقد
Flail	المدرس اليدوي
Flakes	الشظايا
Flow	جريان، تحول
Folivorous	آكل ورق الشجر
Foragers	الصيادون وجامعو الطعام
Foraging	الصيد وجمع الطعام
Foraging societies	مجتمعات الصيد والجمع

Fossil fuel	الوقود الأحفوري
Fracturing	تكسير
Friction	الاحتكاك
Fructivorous	آكل الفواكهة
Fuel cells	خلايا الوقود
Fuelwood	الحطب
Furnace	فرن
Galaxy	المجرة
Gama neutron reactions	تفاعلات غاما النيوترونية

Gastrointestinal tract	الأنبوب الهضمي
Gears	التروس
Generation	توليد (الكهرباء)

Geothermal	حراري - أرضي
Gracile	رشيق، نحيل، كيّس
Gravettian period	العصر الغرافتياني
Gravity	الجاذبية
Great Wall	السور العظيم
Green manure	الروث الأخضر
Grids	الشبكات
Ground adzes	القدّوم المشحوذ
Guns	المدافع
Haft	مسكة الباب، نصاب العدة
Hammers	المطارق
Hammerstones	أحجار المطارق
Harnessing	تطقيم الحصان

Harrowing	تسوية التربة
Harvesting	حصاد
Hearth	الموقد المكشوف
Heat exchange	التبادل الحراري
Heating	التدفئة
Hemmed in	مهمش، مغيب
Herbicides	مبيدات الأعشاب
Herbivores	آكلات العشب
Heterotroph	عضو التغذية
Highways	الطرقات السريعة
Hoeing	تعزيق
Hominid	أشباه البشر
Homo erectus	الإنسان المنتصب

Homo ergaster	الإنسان العامل
Homo habilis	الإنسان الماهر
Homo sapiens	الإنسان العاقل
Horizontal drill	حفار أفقي
Horsepower	وحدة القدرة الحصانية
Horseshoe	حدوة الحصان
Hull	القشرة
Hunger	الجوع
Hunting	الصيد
Husk	قشرة الحبة
Hydroelectric	كهرمائي
Hydrogen bombs	القنابل الهيدروجينية
Ilex	البلوط الأخضر

Induction	التحريض
Industrialization	التصنيع
Infant mortality rates	معدلات وفيات الأطفال
Innovation	الاختراع
Integrated circuits	الدارات المدمجة
Integration	اندماج، تكامل
Intensification	توسيع
Internal combustion	الاحتراق الداخلي
Involution	نكوص
Iron	الحديد
Irrigation	السقاية
Isotopes	النظائر
Jet engine	المحرك النفاث

Jetliners	طائرات الركاب النفاثة
Jib fore	شراع السارية الأمامية
Junk	سفينة شراعية
Kinetic energy	الطاقة الحركية
Labor	العمالة
Lackness	الهزال
Lagomorphs	الأرنبيات
Lampoon	أهجوة لاذعة، سخرية
Lateen	شراع مثلث الشكل
Legumes	البقوليات
Levers	الروافع
Lift	الرفع
Lighting	الإنارة

Lignite	فحم حجري
Loads	الأحمال
Locomotives	القاطرات
Loess	الراسب الغضاري
Low income countries	البلاد منخفضة الدخل
Luminous efficacy	كفاءة التألق
Lupines	ذئبي، الترمس
Mainstay	دعامة أساس
Malleable	قابل للسحب والطرق
Malnutrition	سوء التغذية
Mammals	الثدييات
Mammoth	فيل الماموث
Mandible	الفك السفلي

Manufacturing	صنع
Manure	روث الخيل
Measurements	القياسات
Meat cleaver	سكين لقطع اللحم
Meat	اللحم
Mechanical constraint	القيود الميكانيكية
Mechanization	مكننة
Megafauna	حيوانات ضخمة
Metabolism	الاستقلاب (الأيض)
Metallurgy	علم المعادن
Methane	الميثان
Microprocessors	المعالجات الدقيقة
Midden	كومة روث، مزبلة

Migrations	الهجرات
Mill	الطاحون
Mitochondrial	المتقدرات الحبيبات الخيطية
Mizzenmast	السارية الوسطى
Mola maualis	المطحنة اليدوية
Moldboard	حديدة المحراث، الدجر
Mollusk	من الرخويات
Mulberries	شجر التوت
Multicomponent tools	أدوات متعددة المكونات
Muscles	العضلات
Nazism	النازية
Night soil	براز يستعمل سمادا

Nitrates	النترات
Nitrogen	النيتروجين
Nocturnal	ليلي
Nuclear batteries	البطاريات النووية
Nuclear bombs	القنابل النووية
Nuclear energy	الطاقة النووية
Nuclear reactors	المفاعلات النووية
Nutrition	الغذاء
Nuts	اللوزيات
Obelisks	المسلات
Obesity	البدانة
Omnivorous	قارتة
OPEC	منظمة الأقطار المصدر للنفط (الأوبك)

Opportunist	انتهازي
Opuntia	فصيلة الشوكيات
Opus caementicium	الخرسانة الرومانية
Organism	متعضيات
Oxygen	الأكسجين
Paleolithic age	العصر الحجري
Palmistry	قراءة الكف
Paradox	تناقض
Pastoralist	الرعاة
Peat	الخث
Pectoral	بطني - صدري
Permafrost	الجمد السرمدي
Phosphate	الفوسفات

Photosynthesis	التركيب الضوئي
Phytocoenosis	الغطاء النباتي بمنطقة معينة
Phytolith	أحفور نباتي
Phytomass	الغطاء النباتي
Phytophthora	عفن البطاطا
Plow	المحراث
Plowing	الحراثة
Plowshare	شفرة المحراث
Poleward	متجه نحو القطب
Politics	السياسة
Pollution	التلوث
Poplar	شجر الحور
Population	السكان

Population density	كثافة السكان
Potassium	البوتاسيوم
Power	الاستطاعة، القدرة
Preagricultural	ماقبل الزراعي
Precursory	نذير، تمهيدي

Predation	ضراوة، افتراس، سلب
Prehistory	التاريخ القديم
Preindustrial	ماقبل الصناعي
Premodern	ماقبل الحديث
Pressure	الضغط
Primates	الرئيسات
Prime movers	وسائط التحريك الأولية
Printing	الطباعة

Proboscideans	الخرطوميات
Projectiles	المقذوفات
Properties	خصائص
Pullies	البكرات
Pulse yields	محاصيل مشابهة
Pulses	حبوب يابسة مثل الحمص والعدس
Quadruped	رباعي الأرجل
Quandary	حيرة، ارتباك
Quaternary	رباعي، متألف من أربعة أرباع
Race	مجرى مائي ضيق
Railways	الخطوط الحديدية
Raised terraces	المصاطب المرتفعة
Reconstruction	استقصاء

Refining	تقطير النفط
Relief	نقش حجري
Renewable	متجدد
Rice	الأرز
Rockets	الصواريخ
Rotation	دوران
Roughage	علف خشن مثل النخالة
Royal	شراع صغير
Rye	الجاودار
Sail	الشراع
Scavenging	نبش الجيف
Scratch plow	محراث بدائي
Scruples	أخلاقيات

Scythes	محشات الحصاد
Sedentary	حضري
Self-sufficiency	اكتفاء ذاتي
Seminomadic	شبه بدوية
Serrate	مسنن مثل المنشار
Sickle	المنجل
Siphons	المصافي
Slaked lime	الكلس المطفأ
Slant drill	حفار مائل
Slaves	العبيد
Smelting	صهر المعادن
Smog	الدخان الضبابي
Solar absorption	الامتصاص الشمسي

Solar cell	الخلايا الشمسية
Solar energy	الطاقة الشمسية
Solar radiation	الإشعاع الشمسي

Soybeans	الصويا
Spanker aft	شراع المؤخرة
Stall	مربط الحيوان
Staple crops	المحاصيل النشوية
Steam	البخار
Steel	الفولاذ
Stirrups	الركاب في طقم الخيل
Stoves	مواقد الطبخ
Straw	القش
Streetcar	الحافلات

Stunt	يعوق النمو الطبيعي
Sty	زريبة الخنازير
Surcingle	قشاط الفرس من الظهر إلى البطن
Swingletree	عمود الارتكاز لجر العربة
Synthetic	مركب
Tankers	ناقلات النفط
Tanks	الدبابات
Tapir	حيوان أمريكي يشبه الخنزير
Telegraph	التلغراف
Temporal variability	تنوع زمني
Terra peta	تربة سوداء في حوض الأمازون
Thermal expansion	التمدد الحراري
Thermodynamic energy	الطاقة الحرارية الديناميكية

Thermonuclear fission	الانشطار النووي الحراري
Thermonuclear fusion	الاندماج النووي الحراري
Thermoregulation	تنظيم الحرارة
Tick	حشرة القراد
Tide	يتغلب على صعوبة
Timber studding	استعمال الهياكل الخشبية في البناء
Trace	قشاط الجر
Traditional civilizations	الحضارات التقليدية
Transatlantic crossing	عبور الأطلسي
Transformers	المحولات
Transmission	نقل (الحركة)
Transportation	النقل
Treadwheel	عجلة الدوس

Trophic	متعلق بالغذاء
Trot	خبب
Turbines	العنفات، التوربينات
Turbogenerators	المولدات التوربينية
Ultraviolet	الأشعة فوق البنفسجية
Uncouple	يفك عربات القطار، يفك المقارنة
Ungulates	الحافريات
Unidirectional dissipation	انتشار أحادي الجهة
Untangle	يحل، يفسر
Uranium	اليورانيوم
Vertical drill	حفار عمودي
Vetch	البيقة، نبات علفي
Volatilize	يتطاير

Voluminous	كبير الحجم
Water energy	الطاقة المائية
Waterfowl	البط، طيور مائية
Wattle and daub	البناء من الخشب والطين
Weapons	الأسلحة
Whaling	صيد الحيتان
Wheat	القمح
Wheelbarrows	عربات ذات العجلة الواحدة
Wind energy	طاقة الرياح
Wind power	قوة الريح
Wind	الرياح
Windlass	مرفاع المرساة

Windmill	الطاحونة الهوائية
Withers	كاهل الفرس، الحارك
Wrought	مزخرف، مشغول
Yeast	الخميرة

نبذة عن «إعمار العقارية»:

«إعمار العقارية ش.م.ع.»، شركة مدرجة في سوق دبي المالي، وهي من الشركات الرائدة في مجال التطوير العقاري ومشاريع الحياة العصرية، وتتمتع بحضور قوي في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وآسيا. وتمتلك «إعمار» التي تتخذ من دبي مقراً رئيساً لها، رصيداً يصل إلى 1.7 مليار قدم مربعة من الأراضي في الإمارات العربية المتحدة والأسواق العالمية الرئيسة.

ولدى «إعمار» سجلٌ حافلٌ في استكمال المشاريع وفقاً للمواعيد المحددة، وسلمت منذ العام 2002 أكثر من 63.000 وحدة سكنية في دبي والأسواق العالمية. ولدى الشركة أصول تَّدّرُ إيرادات قوية مستمرة مع أكثر من 880.000 متر مربع من الأصول التي تَدُّر إيجارات، و21 فندقاً ومنتجعاً تضم 4.875 غرفة (تشمل الفنادق المملوكة والخاضعة للإدارة). تسهم عمليات الشركة في قطاعات مراكز التسوق وتجارة التجزئة والضيافة والترفيه، بالإضافة إلى أنشطة «إعمار» في الأسواق العالمية، بنحو 48% من إجمالي إيرادات الشركة.

يعتبر كل من «برج خليفة»، المعلم العمراني العالمي، و«دبي مول»، أكبر وجهات التسوق والترفيه في العالم، من أهم المشاريع التي قامت «إعمار» بتطويرها حتى اليوم. كما أطلقت «إعمار» مشروع «خور دبي»، الذي سيمثل إضافة كبيرة إلى مساهمتها في القطاع العقاري بدبي.

لمزيد من المعلومات،، يرجى زيارة الموقع الإلكتروني:

www.emaar.com

ويمكن زيارة صفحات الشركة على:

www.facebook.com/emaardubai

www.twitter.com/emaardubai

www.instagram.com/emaardubai

1. Gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo. ↑

2. Vergeude keine Energie, verwerte sie ↑

3. تشسترتون G.K. Chesterton م(1874-1936) كاتب إنجليزي كان يرى أن الحضارة بنيت على المجردات على عكس أورويل الذي يخالفه الرأي. وردت في الأصل العبارة pace Chesterton وكلمة pace يبدو أنها مستعارة من لغة أخرى، وهي تعني peace أي السلام. والترجمة الحالية فيها شيء من التصرف (المترجم). ↑

4. الكرتيد تمثال لأنثى يتخذ دعامة بـدلاً من عمود ارتكاز في المعابد القديمة (المترجم). ↑

5. هذا ما أكده أينشتاين في نظريته النسبية ومعادلته الشهيرة التي يوضح فيها العلاقة بين الطاقة والمادة $E=mc^2$ أي إن الطاقة تساوي حاصل ضرب الكتلة بمربع سرعة الضوء. (المترجم) ↑

6. المقصود الاندماج النووي thermonuclear fusion الذي يولد طاقة حرارية هائلة مثلما يحدث عند اندماج 4 ذرات هيدروجين لتتحول إلى ذرة هيليوم (المترجم). ↑

7. الغليون نوع من السفن التجارية أو الحربية الإسبانية الضخمة. ↑

8. Energy Return on Investment. ↑

9. Energy Return on Energy Investment. ↑

10. الخشبين مادة عضوية تشكل مع السليلوز قوام النسيج الخشبي (المترجم). ↑

11. كلمة أولدوان مشتقة من موقع أولدوفاي Olduvai في تنزانيا حيث اكتشف عالم الآثار لويس ليكي Louis Leakey أولى أحجار أولدوان في الثلاثينيات من القرن الماضي (المترجم - ويكيبيديا). ↑

12. الإنسان العامل، أو هومو إرغاستر، ويعرف أيضاً باسم هو إركتوس إرغاستر أو هومو إركتوس الأفريقي، الذي يمشي على قدمين هو كائن منقرض من جنس الهومو الذي عاش في جنوب أفريقيا وشرقها في أوائل عصر البليستوسين بين 1.9 و1.4 مليون عام. (المترجم - ويكيبيديا) ↑

13. البميكان pemmican من أطعمة الهنود الحمر ويتألف من لحم مفروم مقدد ممزوج بالدهن الذائب. ↑

14. تقع المناطق السواحلية في أفريقيا بين الغابات المطيرة في الجنوب والصحراء الأفريقية القاحلة في الشمال. ↑

15. الإمبراطورية الكارولينجية مصطلح يستخدم أحياناً للإشارة إلى إمبراطورية الفرنجة تحت حكم سلالة الكارولينجيين ممن يعتبرون مؤسسي فرنسا والإمبراطورية الرومانية المقدسة (المترجم نقلاً عن ويكيبيديا). ↑

16. قطعة حديدية ملتوية في المحراث تستعمل لقلب التربة (المترجم). ↑

17. الغال هو الاسم الذي أطلقه الرومان على المنطقة التي يسكنها الغاليون وهم شعوب كلتية كانت تمتد إلى شمال إيطاليا وفرنسا وبلجيكا (المترجم). ↑

18. (ما سال من اللجام على خد الحصان - المترجم). ↑

19. (بقايا بذور القطن بعد عصرها لاستخراج الزيت - المترجم). ↑

20. (نبات علفي - المترجم). ↑

21. (إضافة الطباشير أو المرل - طين غني بكربونات الكالسيوم – المترجم) ↑

22. الطواحين السموكية هي الطواحين الهولندية ذات الشفرات الأربع المائلة والأضلاع الثمانية. ↑

23. Grand Menhir Brise ↑

24. Cursus publicus ↑

25. Edictum de pretiis ↑

26. الخث نسيج نباتي نصف متفحم يتكون بتحلل النبات جزئياً في الماء. ↑

27. المردوان هو جسر ضيق يصل بين المركبة والأرض يصعد عليه العمال أو الحمالون. ↑

28. جمع «كير» وهو جهاز لنفخ الهواء في النار ليزيدها اشتعالاً. ↑

29. (مصابيح النيون - المترجم). ↑

30. (القائمة على خفض التكاليف بمضاعفة الإنتاج - المترجم). ↑

31. العربات القمعية هي التي تحمل مواد صلبة سائبة مثل الإسمنت والفحم والقمح والحصى وغيرها بحيث تفرغ من الأسفل مثل القمع (المترجم). ↑

32. Electrolytic production of aluminum ↑

33. Omnivorous أي عاشبة ولاحمة معاً (المترجم). ↑

Table of Contents